

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**

**Fakulta strojní**

**Katedra energetiky**

**Spalovny radioaktivních odpadů**

**Radioactive Waste Incineration Plants**

**Student :**

**Jakub Beránek**

**Vedoucí bakalářské práce :**

**prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.**

**Datum odevzdání :**

**21. 5. 2010**

**Ostrava 2010**

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra energetiky

## Zadání bakalářské práce

Student:

**Jakub Beránek**

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

3907R004 Provoz a řízení v energetice

Téma:

Spalovny radioaktivních odpadů  
Radioactive Waste Incineration Plants

Zásady pro vypracování:

Na základě rešerže vypracujte návrh spalovny nízko radioaktivních odpadů z nemocnic a laboratoří a jaderných elektráren. Uveďte výsledky spalování modelového a radioaktivního odpadu na základě měření prováděných katedrou energetiky.

Proveďte zjednodušený výpočet spalovací komory vybavené stabilizačním hořákem. Proveďte rozbor z hlediska ochrany ovzduší a navrhnete technologie pro čištění spalín. Popište technologické schema spalovny.

Výkon spalovny 100 kg/hod

Výhřevnost odpadů 15 – 35 MJ/kg

Seznam doporučené odborné literatury:

[ 1 ] RÉDR, M., PŘÍHODA, M. *Základy tepelné techniky*. Praha. SNTL, 1991  
ISBN 80-03-00366-0

[ 2 ] SADIK KAKAC. *Boilers, evaporators, condensers*. John Wiley. USA. New York 1991  
CIP 90-22486 v knihovně VŠB.

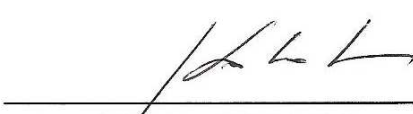
[ 3 ] HEJZLAR, R. *Stroje a zařízení jaderných elektráren*, Díl. 1, 2. Vydavatelství ČVUT v Praze. 2005.  
ISBN 80-01-03190-X.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.**

Datum zadání: 18.12.2009

Datum odevzdání: 21.05.2010

  
prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.  
vedoucí katedry



  
prof. Ing. Radim Farana, CSc.  
děkan fakulty

## **MÍSTOPŘÍSEŽNÉ PROHLÁŠENÍ STUDENTA**

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne .....

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne .....

.....

podpis

Jméno a příjmení autora práce : Jakub Beránek

Adresa trvalého pobytu autora práce : Moravský Žižkov, Bílovská 110, PSČ 69101

## **ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

BERÁNEK, J. *Spalovny radioaktivních odpadů : bakalářská práce*. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2010, 39s. Vedoucí práce : Kolat, P.

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem zařízení určeného k redukci objemu a hmotnosti nízko radioaktivního odpadu spalováním. Uvádí dvě alternativní řešení spalovací pece a dvě metody chlazení spalin. Dále popisuje provoz spalovny tohoto typu v Jaslovských Bohunicích a dokumentuje výsledky měření katedry energetiky VŠB – TU Ostrava na experimentálně postavené spalovně VÚJE. Důležitou částí práce je návrh metod čištění spalin. Výpočtová část se zabývá spalovacími výpočty, návrhem rozměrů, volbou materiálů a prostupem tepla stěnou pece.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Radioaktivní odpad, spalovna, pec, spalovací komora, dohořivací komora, emise, čištění spalin

## **ANNOTATION OF THESIS**

BERÁNEK, J. *Radioactive Waste Inceneration Plants : Bachelor Thesis*. VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Energetics, 2010, 39 p. Thesis head : Kolat, P.

This bachelor work deals with a project of an equipment focused on the volume and weight reduction of the low radioactive waste by burning. There are mentioned two alternative designs of the combustion furnace and two methods of the exhaust gas cooling. The work also describes the processing of this kind of the incineration plant in the city of Jaslovské Bohunice and presents the result of the measurements made by the power industry department VŠB – TU Ostrava at the experimentally built incineration plant VÚJE. As an important part of this work is considered the proposal of exhaust gas treatment methods. The part with calculations of combustion, dimensions proposal, material choice and heat passage is quoted separately in this work.

## **KEYWORDS**

Nuclear waste, incineration plant, furnace, combustion chamber, burn-down chamber, emissions, exhaust gas treatment

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

HEPA	vysoce účinný filtr vzduchových částic	
RA	radioaktivní	
RAO	radioaktivní odpad	
SÚJB	státní úřad pro jadernou bezpečnost	
TZL	tuhé znečišťující látky	
VÚJE	výzkumný ústav jaderných elektráren	
VVER	vodo-vodní energetický reaktor	
$I_{ef}$	efektivní délka paprsku	$[m]$
$K_{1,2,3,4}$	konstanta	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$
Nu	Nusseltovo kritérium	$[1]$
Pr	Prantlovo kritérium	$[1]$
$Q_{ic}$	celková výhřevnost odpadu	$[kJ \cdot kg^{-1}]$
$Q_{ip}$	výhřevnost plynu	$[MJ \cdot m_N^{-3}]$
Re	Reynoldsovo číslo	$[1]$
$T_{SK}$	teplota spalín na výstupu ze spalovací komory	$[K]$
$V_{vz,t}^s$	teoretické množství suchého spal. vzduchu pro odpad	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$
$V_{vz,t,pl}^s$	teoretické množství suchého spal. vzduchu pro plyn	$[m_N^3 \cdot m_N^{-3}]$
$V_{vz,sk}^s$	skutečné množství suchého spal. vzduchu pro odpad	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$
$V_{vz,sk}^v$	skutečné množství vlhkého spal. vzduchu pro odpad	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$
$V_{sp,t}^s$	teoretické množství suchých spalín z odpadu	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$
$V_{sp,sk}^s$	skutečné množství suchých spalín z odpadu	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$
$V_{H_2O}$	obsah vody ve spalínách z odpadu	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$

$V_{sp,sk}^v$	skutečné množství vlhkých spalín z odpadu	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$
$V_{O_{2,t},pl}$	množství spalovacího kyslíku	$[m_N^3 \cdot m_N^{-3}]$
$V_{vz,sk,pl}^s$	skutečné množství suchého spal. vzduchu pro plyn	$[m_N^3 \cdot m_N^{-3}]$
$V_{vz,sk,pl}^v$	skutečné množství vlhkého spal. vzduchu pro plyn	$[m_N^3 \cdot m_N^{-3}]$
$V_{sp,t,pl}^s$	teoretické množství suchých spalín z plynu	$[m_N^3 \cdot m_N^{-3}]$
$V_{sp,sk,pl}^s$	skutečné množství suchých spalín z plynu	$[m_N^3 \cdot m_N^{-3}]$
$V_{H_2O,pl}$	obsah vody ve spalínách z plynu	$[m_N^3 \cdot m_N^{-3}]$
$V_{sp,sk,pl}^v$	skutečné množství vlhkých spalín z plynu	$[m_N^3 \cdot m_N^{-3}]$
$\dot{V}_p$	provozní spotřeba plynu	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
$\dot{V}_{sp,c,n}$	celkový normální průtok spalín	$[m_N^3 \cdot s^{-1}]$
$\dot{V}_{sp,SK}$	skutečný tok vlhkých spalín spalovací komorou	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
$V_{SK}$	objem spalovací komory	$[m^3]$
$\dot{V}_{sp,DK}$	skutečný tok vlhkých spalín dohořívací komorou	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
$V_{DK}$	objem dohořívací komory	$[m^3]$
$c_{sp}$	měrné teplo spalín	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
$d_{sk}$	vnitřní průměr spalovací komory	$[m]$
$d_{dk}$	vnitřní průměr dohořívací komory	$[m]$
$d_{1,2,3,4}$	vnější průměr příslušné vrstvy	$[m]$
$i$	entalpie	$[kJ \cdot kg^{-1}]$
$\dot{m}_{pal}$	množství spalovaného odpadu	$[kg \cdot s^{-1}]$
$n$	přebytek vzduchu pro odpad	$[1]$
$n_{pl}$	přebytek vzduchu pro plyn	$[1]$

$q_l$	teplo sdělené jednomu metru stěny spalovací komory	$[W \cdot m^{-1}]$
$t_2$	teplota spalin na výstupu z chladicího zařízení	$[^{\circ}C]$
$t_s$	teplota přísluné stěny	$[^{\circ}C]$
$t_{sp,1}$	skutečná teplota spalin za spalovací komorou	$[^{\circ}C]$
$z$	ztráty vedením, sáláním a odvodem tuhých zbytků	[1]
$\alpha_{celk}$	celkový součinitel přestupu tepla	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
$\alpha_k$	součinitel přestupu tepla konvekci	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
$\alpha_s$	součinitel přestupu tepla sáláním	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
$\beta$	korekční součinitel	[1]
$\varepsilon_{CO_2}$	poměrná pohltivost oxidu uhličitého	[1]
$\varepsilon_{H_2O}$	poměrná pohltivost vody	[1]
$\varepsilon_L$	opravný součinitel pro krátké trubky	[1]
$\varepsilon_{SO_2}$	poměrná pohltivost oxidu siřičitého	[1]
$\varepsilon_{sp}$	poměrná pohltivost spalin	[1]
$\varepsilon_{st}$	pohltivost stěny	[1]
$\eta_p$	součinitel efektivnosti sálání plynů	[1]
$\lambda_{1,2,3,4}$	tepelná vodivost dané vrstvy	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
$\lambda_{sp}$	tepelná vodivost spalin	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
$\nu$	kinematická viskozita spalin	$[m^2 \cdot s^{-1}]$
$\sigma$	Stefan-Boltzmannova konstanta	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}]$
$\tau_{dk}$	doba setrvání spalin v dohořivací komoře	[s]
$\tau_{sk}$	doba setrvání spalin ve spalovací komoře	[s]



# OBSAH BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>ROZDĚLENÍ RADIOAKTIVNÍHO ODPADU</b>	<b>2</b>
2.1	Podle úrovně aktivity .....	2
2.2	Podle skupenství .....	2
2.3	Ostatní možnosti rozdělení .....	3
<b>3</b>	<b>LIKVIDACE SPALOVÁNÍM</b>	<b>4</b>
3.1	Spalitelné radioaktivní odpady .....	5
3.2	Využití odpadního tepla.....	6
<b>4</b>	<b>SPALOVNA RADIOAKTIVNÍHO ODPADU</b>	<b>6</b>
4.1	Rotační pec .....	7
4.2	Pyrolýzní pec .....	8
4.3	Chlazení spalin.....	10
4.4	Spalovna Jaslovské Bohunice .....	11
<b>5</b>	<b>ČIŠTĚNÍ SPALIN</b>	<b>11</b>
5.1	Hlavní emise .....	12
5.2	Emisní limity.....	12
5.3	Způsoby zneškodňování škodlivin.....	13
5.3.1	Filtrační metody .....	13
5.3.2	Chemické čištění spalin .....	16
<b>6</b>	<b>ZKUŠEBNÍ MĚŘENÍ KATEDRY ENERGETIKY VŠB - TUO</b>	<b>17</b>
6.1	Průběh měření .....	18
6.2	Výsledky měření .....	18
<b>7</b>	<b>SPALOVACÍ VÝPOČTY</b>	<b>20</b>
7.1	Spalovací výpočet pro odpad .....	20
7.2	Spalovací výpočet pro přídavný plyn .....	22
<b>8</b>	<b>NÁVRH SPALOVACÍ PECE</b>	<b>25</b>
8.1	Výpočet teploty za spalovací komorou.....	25
8.2	Spalovací a dohořivací komora.....	27
8.2.1	Rozměry spalovací komory .....	27
8.2.2	Rozměry dohořivací komory .....	28
8.3	Výpočet prostupu tepla stěnou.....	30
8.3.1	Spalovací komora .....	30
8.3.2	Dohořivací komora .....	33
<b>9</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>37</b>
<b>10</b>	<b>POUŽITÁ LITERATURA</b>	<b>38</b>

# 1 ÚVOD

Jedním ze znaků rozvíjející se společnosti je produkce stále většího množství odpadů. Jadernou energetiku, průmyslovou výrobu i jiné oblasti, ve kterých se používají radionuklidy, doprovází vznik radioaktivních odpadů. Ty jsou zdrojem ionizujícího záření, proto patří z hlediska ochrany životního prostředí a negativního dopadu na člověka k těm nejnebezpečnějším. Vznikají v jaderných elektrárnách, nemocnicích, při těžbě uranových rud, ve výzkumných laboratořích nebo vojenské či průmyslové výrobě. Likvidace radioaktivního odpadu je velice problematická. Většinou je tento odpad skladován ve speciálních úložištích, jejichž chod zajišťuje Správa úložišť radioaktivních odpadů, kterou zřizuje Ministerstvo průmyslu a obchodu. Nízko radioaktivní odpad ale můžeme kontrolovaně spalovat, čímž dochází k značné redukci jeho objemu a hmotnosti. Výsledným produktem je popel a popílek, v němž zůstává uložen nebezpečný radioaktivní obsah, který se dále zpracovává a ukládá na úložiště RAO. Tato technologie je ve světě hojně používaná a i přes nepochybně dobré výsledky, vysokou účinnost filtrace spalín a nepravděpodobný únik radioaktivních látek do okolí, je ekologickými aktivisty a částí společnosti vnímána jako nebezpečná. Ačkoliv koncepce vlády o zacházení s RAO, formulovaná v 80. letech minulého století, předpokládala uvedení těchto spaloven do provozu, v dnešní době se spalovna radioaktivního odpadu na území České republiky nenachází.

## 2 ROZDĚLĚNÍ RADIOAKTIVNÍHO ODPADU

Radioaktivní odpady jsou nevyužitelné materiály, které obsahují radionuklidy nebo byly radionuklidy kontaminovány. Ročně v České republice vzniknou stovky tun takového odpadu. V roce 2009 bylo podle zprávy SÚJB na našich úložištích uskladněno 540,8 t RAO. Radioaktivní odpady rozdělujeme :

### 2.1 Podle úrovně aktivity

#### **Nízko aktivní RAO (LLW - Low Level Wastes)**

Vznikají v jaderných elektrárnách, ale i v průmyslu, polnohospodářství, při výzkumu nebo v nemocnicích. Jedná se především o kontaminovaný papír, tkaniny a oděvy, ochranné pracovní pomůcky, zamořené plasty, dřevo, kapaliny s látkami o malém obsahu radioaktivity, vyřazené stroje, odpadní plyny z ventilací apod. Představují okolo 90 % objemu veškerých RAO, ale jen necelé procento celkové radioaktivity. [10, 15]

#### **Středně aktivní RAO (ILW - Intermediate Level Wastes)**

Jsou více radioaktivní než LLW, což přináší problémy při manipulaci s nimi. Převážně vznikají v jaderných elektrárnách nebo při těžbě uranových rud. Jsou to např. obaly jaderného paliva, pryskyřice, chemické kaly, hlušina, výluhy z těžby atd. Tekuté látky nebo malé předměty mohou být solidifikovány v betonu nebo bitumenu. Představují přibližně 7 % objemu a 4 % radioaktivity všech RAO. [15]

#### **Vysoko aktivní RAO (HLW - High Level Wastes)**

Radiotoxicita je velmi vysoká, produkují intenzivně tepelnou energii. Patří sem odpady z obohacování a výroby jaderného paliva, vyhořelé palivové tyče a odpady související s jejich přepravou. Manipulace s nimi je nebezpečná, vyžaduje chlazení a odstínění. Obsahují více než 95 % celkové radioaktivity všech RAO. [15]

### 2.2 Podle skupenství

#### **Pevné**

Jejich vznik často souvisí s výměnou komponentů a údržbou v jaderných elektrárnách. Materiály se stanou radioaktivními buď kontaminací - při styku s aktivní

látkou, nebo přímým vlivem RA záření. Pevné RAO rozdělujeme na měkké a tvrdé.

U měkkého odpadu se jedná o papír, textil, dřevo, sklo, plasty, izolační materiály, filtry a jejich náplně, atd. Tvrdý odpad je především kovový, např. opotřebované části strojového zařízení, nářadí, měřicí přístroje, odřezky armatur, laboratorní pomůcky, apod. K pevným RAO řadíme také vyhořelé jaderné palivo a radioaktivní popel ze spalovacích pecí. [15, 21]

### **Kapalné**

Jedná se o širokou škálu odpadních vod různého chemického složení a rozdílné míry aktivity. Objemově tvoří největší část RAO z provozu jaderné elektrárny. Některé z nich, většinou se jedná o drenážní vody z potrubních systémů, lze dekontaminovat a znovu použít nebo vypustit. Ostatní se musí speciálními technologiemi (např. cementace, vitifikace) upravit do formy vhodné pro dlouhodobé skladování na úložištích RAO. Tyto nepoužitelné RA kapaliny reprezentují nejčastěji koncentráty z odpařovacích stanic, nasycené iontoměniče a kaly. Vysoko radioaktivní kapaliny se někdy označují jako mokré pevné odpady. [15, 21]

### **Plynné**

Plynné RAO, vznikající při provozu jaderné elektrárny, představují vzhledem k ostatním skupenstvím asi nejmenší problém. To souvisí s poměrně krátkými poločasy rozpadu obsáhnutých radionuklidů. Jedná se o radioaktivní částice rozptýlené v plynu, plynné radioaktivní prvky nebo aerosoly. Použitím vysoce účinných filtrů se plyny zbavují radioaktivních částic a poté se komíny vypouští do životního prostředí. [15, 21]

## **2.3 Ostatní možnosti rozdělení**

Další rozdělení můžeme provést podle poločasu rozpadu radionuklidů na přechodné, krátkodobé a dlouhodobé. [25]

Původ RAO je dalším kritériem jejich rozdělení. Většina vzniká v jaderných elektrárnách. Tento odpad má relativně stejnorodý charakter. Naopak institucionální RAO nebo odpad z jiných zdrojů je převážně různorodého charakteru. V České republice tvoří zhruba pětinu veškerého objemu radioaktivního odpadu. [8]

Po zavedení objemové redukce se začal používat nový způsob rozlišování RAO, podle možné technologie zpracování [8] :

- **U** – vysoko aktivní odpad pro uložení bez zpracování
- **L** – lisovatelný odpad
- **S** – spalitelný nízko aktivní odpad

Dále rozdělujeme RAO do pěti kategorií podle koncentrace radionuklidů, obsahu dlouhodobých zářičů a produkce zbytkového tepla, které jsou důležité hlavně z hlediska uložení RAO.

Naším cílem je dosáhnout objemové redukce spalováním nízko aktivního odpadu (do  $3,7 \cdot 10^2 \text{ Bq} \cdot \text{cm}^{-2}$ ). Ten je nevýznamným producentem tepelné energie, má nízkou koncentraci radionuklidů i dlouhodobých zářičů. [7]

### 3 LIKVIDACE SPALOVÁNÍM

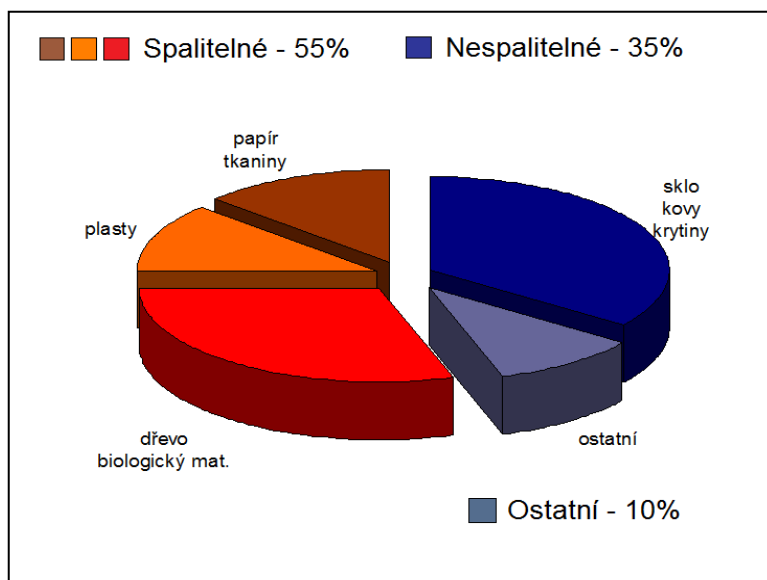
Spalování je jednou z možných metod zneškodnění odpadů, jak komunálních tak i nízko radioaktivních. Kvůli jejich rostoucí produkci nabývá tato metoda velkého významu. Spalováním pevných a kapalných nízko radioaktivních odpadů dochází k významné redukci nároků na skládkové a úložištní kapacity a vynechání jinak nevyhnutelné a drahé úpravy radioaktivních kapalin. Navíc spalovny s energetickým využitím přinášejí úsporu fosilních paliv.

Více než polovina pevných RAO je spalitelných. Touto metodou dochází k padesáti až stonásobné redukci původního objemu, přičemž zhruba 97 % radioaktivity přejde do popela a zbytek je zachycen při filtraci spalin. Spalováním se přitom dají odstranit i oleje, maziva nebo rozpouštědla, jejichž úprava před uložením je jinak velmi obtížná a finančně náročná. [8, 22]

Spaliny se z pece odvádí přes složitý čistící systém, kde se vyčistí od aktivních složek a potom se vypustí komínem. Snahou je spalovat s minimálním množstvím úletů ve spalinách. Výsledný tuhý zbytek ve formě popelu a popílku je následně zpracováván (převážně cementací do sudů, ty jsou vkládány do kontejnerů a zality cementovou kaší) a skladován na úložišti RAO. [22]

Vzhledem k nebezpečnosti odpadu je během spalování dbáno na bezpečnostní opatření a legislativní podmínky, samozřejmostí je soustavné měření úrovně radioaktivity.

Na obr. 3-1 je zobrazen přibližný poměr spalitelného a nespalitelného pevného RAO, včetně rozdělení na jednotlivé materiály.



Obr. 3-1: Poměr spalitelného a nespalitelného RAO [22]

### 3.1 Spalitelné radioaktivní odpady

Jakost paliva je určována třemi hlavními hodnotami – obsahem hořlaviny, popeloviny a vody. Pokud má odpad dostatečný obsah hořlaviny, je schopný hoření. Přibližné typické hodnoty výsledků výhřevností z fyzikálních rozborů běžných odpadních materiálů jsou zobrazeny v tab. 3-1.

Spalitelné RAO je nutné mísit v takovém poměru, aby bylo zajištěno trvalé hoření směsi. V počáteční fázi spalování a v případech, kdy výhřevnost odpadů je příliš malá nebo má materiál tendenci ohořet pouze na povrchu, je nutné použít přídavného paliva.

Materiál	Výhřevnost [ $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ]
Směs papíru	17,6
Polyetylén	43,4
Polystyrén	38,1
Polyuretan	26
PVC	22,5
Směs dřeva	15,4
Pryž	34,9

Tab. 3-1: Výhřevnosti materiálu [19]

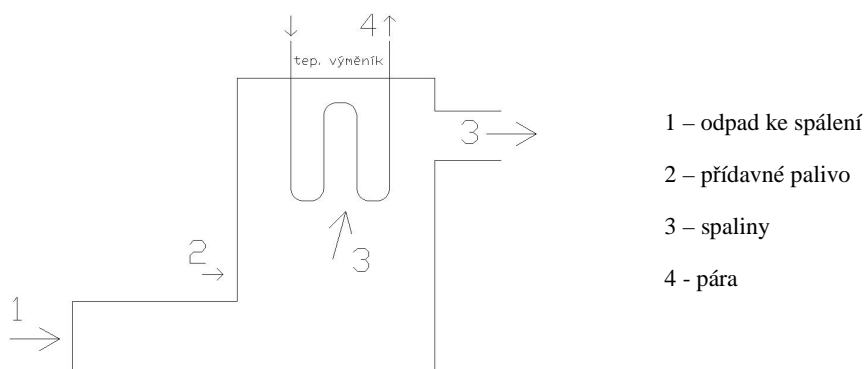
Aby nedocházelo např. k tvorbě sazí, zanášení chladiče a filtru, nedostatku  $O_2$  nebo zhoršení tahových poměrů s nebezpečím vniknutí radioaktivních plynů do

prostoru spalovny, musí být optimálně nastaven poměr mezi pevným, kapalným, nízko výhřevným (papír, tkaniny) a vysoko výhřevným (plastické hmoty) odpadem. Optimálním způsobem dávkování a prokládáním spalovaných odpadů lze zamezit nebo minimalizovat vznik oxidu uhelnatého. Vhodná hmotnost jedné dávky odpadu pro výkon spalovny  $100 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$  se pohybuje mezi 5 až 12 kg, podle složení odpadu a intervalu dávkování. [8]

### 3.2 Využití odpadního tepla

Teplo uvolněné spalováním odpadu se dá využít jednak k předehřátí spalovacího vzduchu pomocí rekuperativního výměníku nebo k výrobě páry či teplé užitkové vody. Nejčastěji se u spaloven odpadů uvolněné teplo využívá k výrobě páry. Na obr. 3-2 je zobrazeno schéma výroby páry, popř. teplé vody.

Investice do tepelných výměníků se nemusí ekonomicky vyplatit. Je třeba zvážit, zda spalovna o daném výkonu, s ohledem na dobu během které je v provozu, dokáže zásobovat místo spotřeby. Také je možné, že se pro páru nebo teplou vodu nenajde využití.



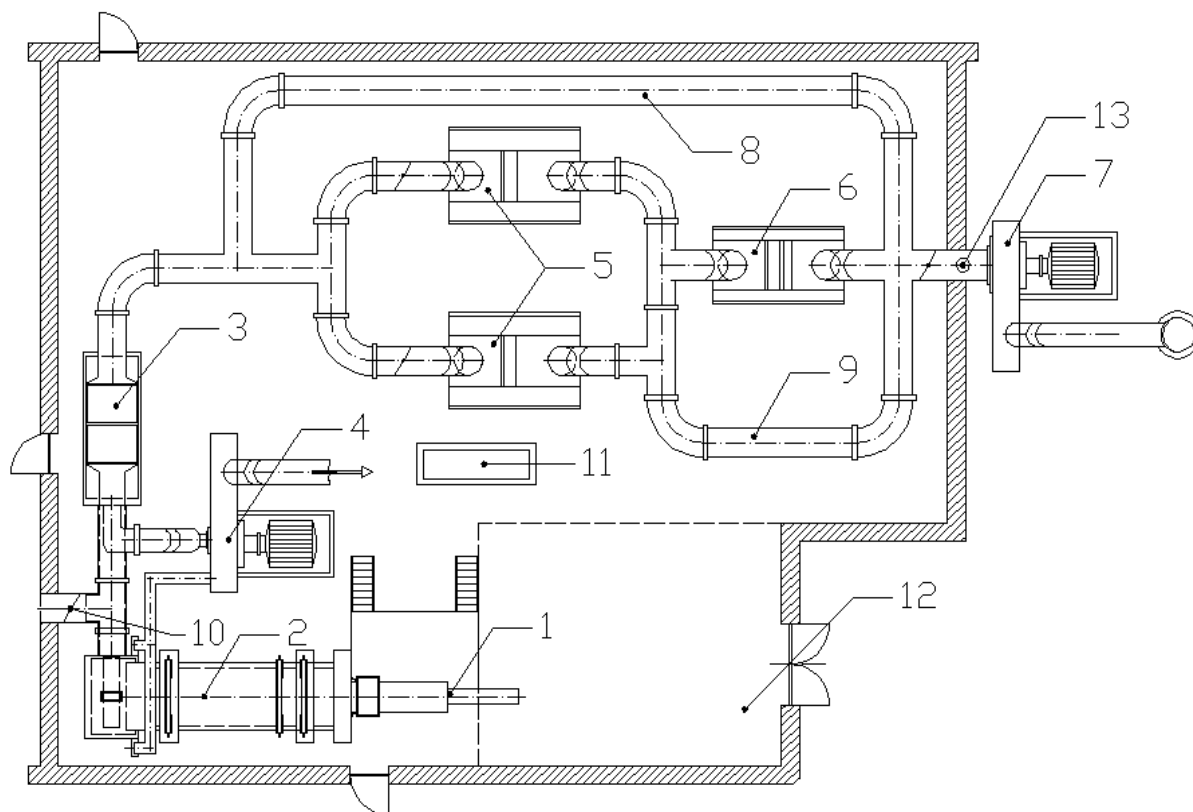
Obr. 3-2: Schéma využití odpadního tepla

## 4 SPALOVNA RADIOAKTIVNÍHO ODPADU

Každá spalovna RAO by měla zajišťovat následující technologické funkce [11] :

- příjem a skladování RAO
- sázení a spalování RAO
- chlazení nebo využívání tepla spalin
- čištění a odvod spalin
- bezpečné zpracování RA pevných zbytků po spalování

Spalovna je zjednodušeně tvořena spalovací pecí s dohořivací komorou (kde je dávkovacím zařízením zajištěn přísun RAO ze skladu), chladičem spalin, zařízeními pro čištění spalin a spalinovým (popř. i vzduchovým) ventilátorem. Technologické schéma spalovny s rotační pecí je zobrazeno na obr. 4-1.



- |                                      |                        |
|--------------------------------------|------------------------|
| 1 – Dávkovací zařízení               | 8 – Obtok spalin I     |
| 2 – Rotační pec s dohořivací komorou | 9 – Obtok spalin II    |
| 3 – Trubkový chladič spalin          | 10 – Směšovací klapka  |
| 4 – Vzduchový ventilátor             | 11 – Ovládací panel    |
| 5 – Tkaninové filtry                 | 12 – Místo uložení RAO |
| 6 – Absolutní filtr                  | 13 – Měření radiace    |

**Obr. 4-1: Technologické schéma spalovny RAO [8]**

Spalovna RAO může být vybavena různými druhy spalovacích zařízení. V úvahu připadají např. níže uvedené pece.

## 4.1 Rotační pec

Rotační pece nalézají široké uplatnění při spalování nebezpečných nebo klinických odpadů. Na vstupní hlavu s plnicím otvorem navazuje otáčivý ocelový

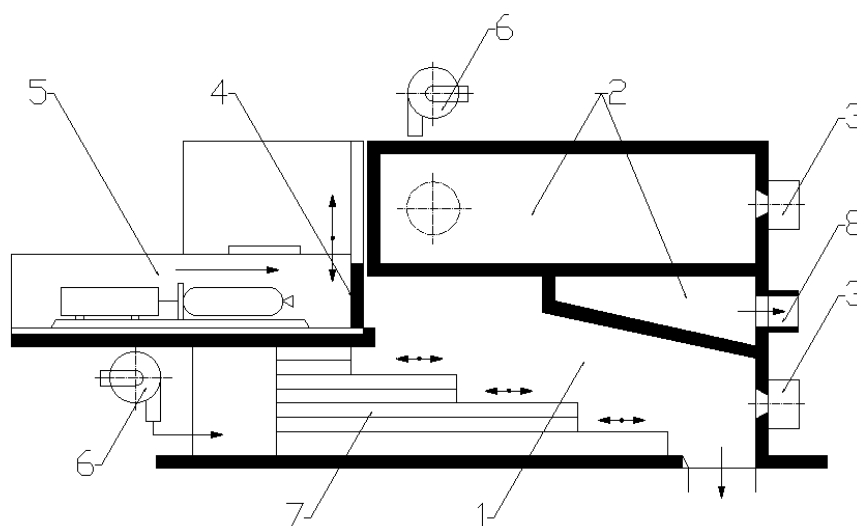


- Obr. 4-2: Schéma návrhu rotační pece na spalování RAO [8, 9]**

Spalovací pec může pracovat také na principu pyrolýzy. Tento způsob spalování RAO spočívá v jeho destilaci s částečným přístupem vzduchu, následném spálení uvolněných plynů a získání suchého koksového zbytku, který vyhoří v peci. Ke zplyňování dochází již při teplotě okolo 400 °C. Pyrolýzní zařízení k spalování komunálních odpadů jsou v provozu např. v Německu a Francii. Pyrolytická metoda je výhodná v tom, že některé škodlivé látky, např. těžké kovy, chloridy, dioxiny, radionuklidy a různé soli, zůstanou vázány na tuhý zbytek destilace a nedostanou se do spalin. Tento účinek lze posílit přidáním vápna do RAO. [5, 8]

Pyrolýzní pec na spalování RAO je dvoukomorová, přičemž každá komora obsahuje jeden hořák na zemní plyn a druhý upravený hořák na spalování kapalných RAO. Pro ustálený provoz spalovny musí být zaručen určitý rozptyl teplot, který bude v peci udržován. Teplota nesmí klesnout natolik, aby nedocházelo ke kvalitnímu zplyňování a následnému vyhoření, a také nesmí překročit maximální přípustnou spalovací teplotu v dohořivací komoře. Tento teplotní interval se udržuje regulací přívodu vzduchu do pyrolytického prostoru. Optimální teploty se stanoví zkušebními měřeními. Dávkovací zařízení dodává, v závislosti na teplotě a podtlaku v peci, optimální množství roztržiděného RAO. Podtlak v peci je řízen podle potřeby regulační klapkou, kterou se vyrovnávají tlaky před spalinovým ventilátorem. Promíchávání odpadu zabezpečuje přesuvný mechanický rošt. Výhodou tohoto typu roštu jsou relativně nízké hodnoty úletu popílku ve spalínách. Úlet tuhých částic nepřesahuje  $30 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Nedoporučuje se použití pásového roštu, vzhledem k tomu, že není schopen přesouvat a překlápět odpad a snadno může dojít k povrchovému spékání některých jeho složek. Vhodnou alternativou k přesuvnému roštu by mohl být rošt bubnový. Dokonalé vyhoření všech spalitelných zbytků zajistí dohořivací komora. Schéma pece je zobrazeno na obr. 4-3. [8, 26]

V takové peci lze spalovat odpad i klasickým způsobem. U klasického způsobu spalování se spalovací teplota pohybuje mezi  $700^\circ\text{C} - 1000^\circ\text{C}$ , v dohořivací komoře dosahuje teplot  $900^\circ\text{C} - 1250^\circ\text{C}$ .



1 – pyrolýzní prostor pece

2 – dohořivací komora

3 – stabilizační hořák

4 – plnicí otvor

5 – podávací zařízení

6 – přívod vzduchu

7 – přesuvný rošt

8 – odvod spalín

**Obr. 4-3: Schéma návrhu pyrolýzní pece na spalování RAO [8]**

Legislativně je dáno, že spaliny z nebezpečného nebo klinického odpadu musí v dohořivací komoře setrvat minimálně 2 vteřiny, aby došlo k dokonalému vyhoření všech jejich spalitelných složek. Popel vznikající ve spalovně je přes výsypku odváděn do sudů o objemu 200 dm<sup>3</sup> a dále je zpracováván na cementační lince. Celý proces je řízen dálkově.

### 4.3 Chlazení spalin

Existují dvě varianty řešení spaloven RAO, které se navzájem liší způsobem chlazení spalin. Pro obě varianty přepokládáme podtlakový režim, díky kterému je sníženo nebezpečí úniku radioaktivních plynů. [3]

První možností je spalovna s chlazením spalin pomocí trubkového výměníku (viz. obr. 4-1). Zde je chlazení spalin zabezpečeno trubkovým výměníkem spaliny – vzduch. Nelze použít výměník spaliny – voda z důvodu možného kontaminování chladícího média. Při maximálním nárůstu teploty spalin je provedeno směšování se vzduchem, pomocí klapky ovládané regulátorem. Vlivem akumulace tepla je regulace teploty spalin u této metody pomalejší. Také dochází k zanášení výměníku. Naopak výhodný je vznik až pětinasobně menšího množství spalin oproti druhé variantě. Proto budou nižší také nároky na spalinové ventilátory a filtry. [3]

Druhou variantou je spalovna s chlazením spalin přisáváním vzduchu. Podle teploty spalin na výstupu z chladiče, zajišťuje regulátor přísun potřebného množství chladícího vzduchu pomocí klapky na vzduchovém potrubí. Vzduch je průchodem přes lopatkovou mříž dokonale promíchán se spalinami, čímž dojde k jejich ochlazení ve směšovacím chladiči. Chladící výkon vzduchu je tedy dán jeho objemovým průtokem.

Snímáním teploty před vstupem do tkaninového filtru je regulován průtok chladičem. Regulační klapkou směšovacího zařízení se nastaví požadovaná teplota, která ale nesmí klesnout pod rosný bod spalin. Pokud tato situace nastane a spaliny se vysráží, automaticky se otevře nouzový obtok, kterým se tekuté spaliny vedou okolo filtrů, aby nedošlo k jejich poškození. Instalovány jsou 2 větve tkaninového filtru, kde jedna slouží jako rezervní. Ty zajišťují hrubou filtraci ochlazených suchých spalin od škodlivin, zachycení radionuklidů se provádí absolutním filtrem. [3]

## 4.4 Spalovna Jaslovské Bohunice

Největším evropským výrobcem spaloven RAO je německá firma NUKEM Technologies. Tato společnost se zabývá komplexním řešením otázky zpracování odpadu a vývojem nových technologií jejich likvidace. V roce 2000 dostavěl NUKEM v Jaslovských Bohunicích na sousedním Slovensku spalovnu pevných a kapalných RAO, včetně třídícího, cementačního a odpařovacího centra, vysokotlaké lisovny a nukleárního monitorovacího systému. Další spalovny postavené touto firmou v posledních letech se nachází hlavně v zemích bývalého Sovětského svazu, v Rusku (Leningrad, Balakovo), na Ukrajině (Černobyl, Chmelnitzki) nebo v roce 2009 dostavěná spalovna RAO o výkonu  $100 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$  v Litevské Ignalině. [17]

Pec spalovny v Jaslovských Bohunicích je konstruována jako šachtová. Pevný odpad je dávkován shora. Výkon zařízení dosahuje  $50 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$  při spalování pouze pevného odpadu, při společném spalování kapalných a pevných RAO lze dosáhnout výkonu  $30 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ . V prostorách pece nejsou instalovány tepelné výměníky ani jiná zařízení, tím pádem nedochází k využití odpadního tepla, ale pouze k redukci objemu a hmotnosti RAO. Spalovací teplota se pohybuje mezi  $800^\circ\text{C}$  –  $1050^\circ\text{C}$ , teplota v dohořovací komoře je  $850^\circ\text{C}$  –  $1100^\circ\text{C}$ . V dolní části dohořovací komory je snížena teplota na  $850^\circ\text{C}$  vstřikováním vody s obsahem redukčního činidla, tím dochází k snížení emisí  $\text{NO}_x$ . Následně jsou spaliny ochlazeny až na  $340^\circ\text{C}$ , tím se zredukuje tvorba dioxinů. Po všech následujících procesech (mokrý vypírka, HEPA – filtr) je účinnost čištění spalin více než 99,9 %. [24]

## 5 ČIŠTĚNÍ SPALIN

Nevýhodou spalování jsou emise škodlivin v plynných produktech spalování. Spalovny musí být povinně vybaveny účinným systémem čištění spalin. Znečišťující látky obsažené ve spalinách jsou např.  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ , chlór, fluór, různé anorganické látky, těžké kovy a jejich sloučeniny a jiné znečišťující látky. Při spalování RAO jsou vzniklé spaliny navíc radioaktivní, jejich aktivitu unášejí pevné částice a prchavé složky spalin, proto musí docházet k odpovídajícímu čištění.

Emise do ovzduší jsou ovlivněny především :

- Složením RAO
- Technickými opatřeními pece
- Konstrukcí a činností zařízení určených k čištění spalin

## 5.1 Hlavní emise

### Oxidy dusíku

Hlavními oxidy dusíku, které během spalování emitují, jsou oxid dusnatý (NO), oxid dusičitý (NO<sub>2</sub>) a oxid dusný (N<sub>2</sub>O). Tvorba NO<sub>x</sub> je značně závislá na teplotě. Pokud spalování probíhá s teplotou pod 1000 °C, jsou emise NO<sub>x</sub> mnohem nižší. Tvorba NO<sub>x</sub> pak závisí hlavně na dusíku obsaženém ve spalovaném odpadu. Naopak se prokázalo, že nižší teploty spalování mají ze následků vyšší emise N<sub>2</sub>O. Mechanismus tvorby N<sub>2</sub>O není ještě zcela vyjasněn. [5]

### Oxidy síry

Emise oxidů síry pocházejí hlavně ze síry přítomné v palivu. Během spalování se zdaleka největší množství oxidů síry projevuje jako oxid siřičitý (SO<sub>2</sub>). [5]

### Oxid uhelnatý

Oxid uhelnatý se objevuje při spalovacím procesu vždy jako meziprodukt a zejména při podstechiometrických podmínkách spalování. Vznik CO je indikátorem nedokonalého spalování a možnosti vzniku koroze, proto je cílem zamezit jeho vzniku nebo jej minimalizovat. [5]

### Těžké kovy

K emisím těžkých kovů, které označujeme jako stopové kovy, dochází následkem jejich přítomnosti v palivu, proto jejich emise závisí na chemickém složení spalovaného RAO. Mezi uvažované těžké kovy patří Pb, As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Se, Zn, V. [5]

### Prach a TZL

Druh použitého procesu spalování má značný vliv na podíl popílku strženého emisemi spalných plynů z kotlů. Například kotle s pohyblivým roštem vytvářejí poměrně malé množství polétavého popílku. Problémy pro životní prostředí mohou nastat při výskytu částic menších než 2,5 μm v průměru. [5]

### Chlorovodík, Fluorovodík

K emisím HCl a HF dochází přítomností stopových množství chloridů a fluoridů v odpadech. Když se RAO spalují, uvolňují se malá množství těchto látek. Některé z nich se spojí s vodíkem za vzniku chlorovodíku nebo flourovodíku. [5]

## 5.2 Emisní limity

Při spalování RAO nesmí vyčištěné spaliny odcházející do ovzduší vykazovat

radioaktivitu nebezpečnou člověku nebo životnímu prostředí. Emisní limity přímo pro spalovny radioaktivních odpadů u nás nejsou legislativně dány, protože se v Česku tento typ spalovny nenachází. Proto uvádím v tab. 5-1 (podle přílohy č. 9 k nařízení vlády č. 354/2002 Sb.) emisní limity pro spalovny nebezpečného odpadu spalující infekční nemocniční odpad, který je svým charakterem a nebezpečností RAO podobný. Tyto limity jsou vztaženy na teplotu 273,15 K, tlak 101,32 kPa, referenční obsah kyslíku 11 % a suchý plyn. Požadavky na měření emisí jsou uvedeny ve výše zmíněném vládním nařízení.

Znečišťující látka	Hmotnostní koncentrace (limitní hodnota) [mg·m <sup>-3</sup> ]
TZL celkem	30
Těžké kovy	
Pb + Cu + Mn	5
Ni + As + Cr + Co	2
Cd + Hg + Tl	0,2*
plynné sloučeniny chloru vyjádřené jako HCL	30
plynné sloučeniny fluoru vyjádřené jako HF	2
TOC	20
SO <sub>2</sub>	300
NO <sub>x</sub>	500
PCDD+PCDF	0,1**
CO	100

\* z toho Hg max. 0,1 mg·m<sup>-3</sup>

\*\* PCDD + PCDF vyjádřeno v ng·m<sup>-3</sup>

**Tab. 5-1: Emisní limity**

### 5.3 Způsoby zneškodňování škodlivin

V zásadě můžeme škodliviny obsažené ve spalinách zachytit použitím filtračních nebo chemických metod. Obě metody bývají často kombinovány, aby bylo dosaženo co nejvyšší účinnosti čištění spalin.

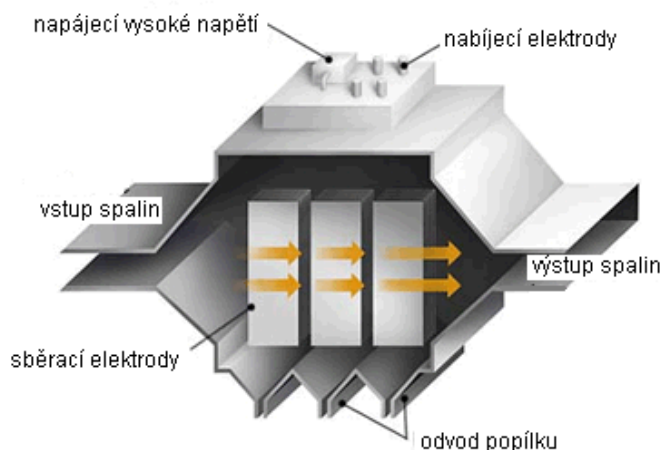
#### 5.3.1 Filtrační metody

##### Elektrostatické odlučovače

Elektrostatické odlučovače jsou využívány k dosažení nízké hodnoty úletu tuhých znečišťujících látek, odlučováním popílku vznikajícího při spalování. Standardně tvoří tzv. primární stupeň čištění spalin. Využívají vzniku přitažlivých sil mezi elektricky nabitými částicemi TZL a opačně nabitou sběrací elektrodou. [5]

Spaliny jsou vedeny do aktivního prostoru elektrostatického odlučovače přes vstupní díl s rozdělovacími stěnami, které zajišťují rovnoměrné rozložení spalin po celém průřezu elektrostatického odlučovače. Aktivní prostor tvoří systém elektrod, kde vzniká silné elektrostatické pole. V tomto elektrostatickém poli se odlučované částice nabíjí a usazují na povrchu elektrod. Mechanickým oklepáváním se usazené částice uvolňují a padají do výsypek ve spodní části elektrostatického odlučovače, odkud jsou odváděny k uložení, jak je zřejmé z obr. 5-1. [5] K výhodám elektrických odlučovačů patří :

- dlouhá životnost zařízení
- nízké provozní náklady
- nenáročnost na obsluhu zařízení
- nízká tlaková ztráta
- menší citlivost na překročení teplot spalin



**Obr. 5-1: Elektrostatický odlučovač [13]**

### **Tkaninové filtry**

Tkaninová filtrace je široce používanou metodou k odstraňování částic, zejména poléťavého popílku, u menších spalovacích nebo průmyslových zařízení. Tkaninové filtry se obvykle používají v provozu při teplotě spalin do 250 °C.

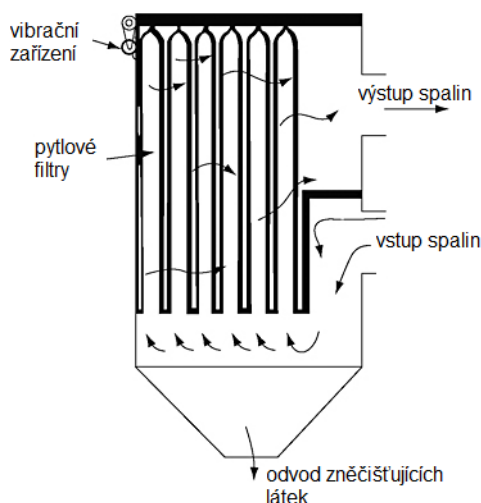
Jednotka tkaninových filtrů obsahuje jeden nebo více izolovaných oddílů, které se skládají z řady tkaninových pytlů nebo rukávů. Plyn s částicemi prochází vzhůru podél povrchu pytlů a potom šikmo tkaninou. Částice se zachycují na rubové straně pytlů. Při čištění filtru se radioaktivní prach nahromaděný na pytlích odstraňuje z povrchu tkaniny, skladuje se a následně zpracovává. [5]

Pravidelné odstraňování prachu z tkaniny je důležité k tomu, aby se udržovala

efektivní účinnost odlučování, ale ovlivňuje také provozní životnost filtru. Tkaninové filtry se běžně třídí podle metody čištění filtračního média (reversní průtok vzduchu, mechanické setřásání, vibrace, pulsace stlačeným vzduchem apod.). Běžné čistící mechanismy nevracejí filtr do jeho původního stavu. Částice usazené hluboko uvnitř látky napomáhají snižovat velikost pórů mezi vlákny, tím umožňují dosáhnout vysokou účinnost zachycení i částic menších než 1 mikron. [5]

Výhodou tkaninových filtrů je vysoká účinnost filtrace, provozní spolehlivost a výrazně nižší investiční náklady než na elektrostatický odlučovač. Provozní náklady kolísají v závislosti na typu filtru, jeho provozu a čištění a na filtračním materiálu. Výdaje na výměnu filtru činí asi 10 % investičních nákladů. [5]

Obr. 5-2 zobrazuje možné uspořádání tkaninového filtru. Nečistoty ze spalín jsou zachyceny pytlíkovými filtry, sací vzduchový ventilátor odvádí spaliny do dalšího stupně čištění. Filtry jsou čištěny vibracemi.



**Obr. 5-2: Schéma uspořádání tkaninového filtru [14]**

Existují dva druhy tkaninových filtrů, lišící se tvarem filtrační látky :

- **Kapsové** – tvar látky je plošný, většinou čtvercový nebo obdélníkový, stálost tvaru zajišťuje drátěná vložka
- **Hadicové** – filtrační látka tvoří hadice různého průměru, vyztužené kovovými kroužky

### **Absolutní filtry**

Tyto zařízení zabezpečují u spaloven RAO zachycení radionuklidů. Jedná se o koncový stupeň filtrace. Tvz. HEPA filtry dokážou odloučit i mikročástice a aerosoly o rozměrech 0,3  $\mu\text{m}$  s účinností přesahující 99,9 %. Je vhodné je kombinovat s tkaninovými filtry nebo elektrostatickými odlučovači.



### 5.3.2 Chemické čištění spalin

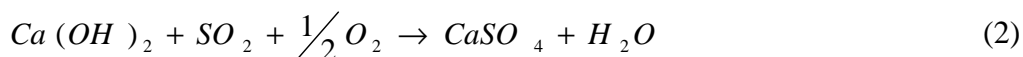
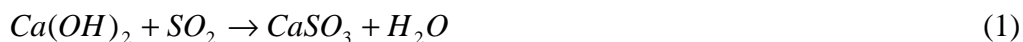
#### Mokrá metoda

Pro mokrou metodu je charakteristické, že teplota spalin je nižší než teplota jejich rosného bodu. U mokrých procesů se propírají spaliny ve sprchových pračkách zásaditou kapalinou. Tou bývá nejčastěji roztok vápenného mléka ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) nebo hydroxidu sodného ( $\text{NaOH}$ ), které jsou schopné na sebe chemicky vázat, přeměnit nebo absorbovat škodliviny obsažené ve spalinách. Tato metoda dosahuje vysoké účinnosti čištění spalin od plynných kontaminujících látek, kyselých složek a prachových částic. Není však vhodná na čištění velkých hrubých částic, proto je potřebné tyto TZL před vstupem do pračky zachytit, např. elektroodlučovačem nebo tkaninovým filtrem. [5]

Nevýhodou této metody, při použití u spaloven RAO, je vznik kapalné radioaktivní látky, která je problematická. Musí se buď dekontaminovat, nebo zpracovat a uskladnit na úložiště. Mokrá vypírka se častěji využívá při spalování komunálního odpadu, ale také při spalování RAO např. v Jaslovských Bohunicích.

#### Polosuchá metoda

Polosuchá metoda spočívá v průchodu znečištěných spalin absorbérem přes rozprášenou vápennou suspenzi. Během toho se určité škodlivé látky ze spalin chemicky navážou na mokrý vápenec za adiabatického odpaření vody ze suspenze. [5]



Po odpaření vody zůstanou pouze malé pevné částice, které jsou dále unášeny spalinami a zachyceny do tkaninového filtru nebo elektroodlučovače. Nezreagované částice vápenné suspenze padají ke dnu absorbéru do jímky. Teplota spalin musí být stále nad teplotou rosného bodu. [5]

Účinnost polosuché metody je nižší než metody mokré, přesto nachází uplatnění. Její použití je vhodné i pro čištění spalin vzniklých spalováním RAO, protože jejím výsledkem je tuhý RA zbytek, který je z bezpečnostního, ekologického i ekonomického hlediska vhodnější na zpracování a skladování než RA kapalina vzniklá mokrým čištěním.

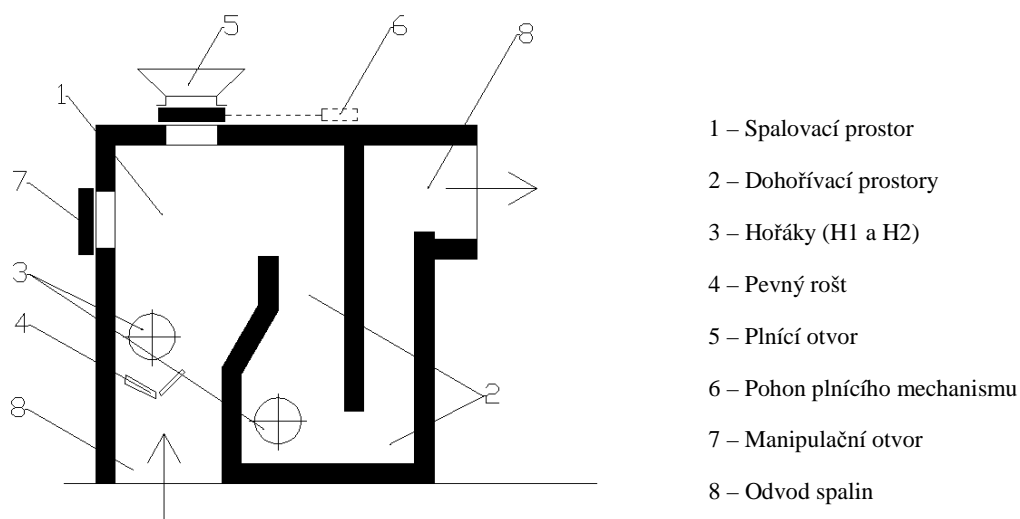
## Suchá metoda

Proces je výhodný pouze kvůli svojí jednoduchosti. Vápenec, popř. jiný sorbent je dávkován přímo do odpadu, někdy také při čistění spalin nástřikem sorbetu v práškovém stavu. [5]

Účinnost této metody je velmi malá, navíc aplikace suché aditivní metody je často spojena s nutností častější údržby elektroodlučovače, nebo výměny tkaninových filtrů, protože se s nástřikem prášku zvýší koncentrace a kvalita tuhých částic ve spalinách. Tato metoda čistění spalin se již téměř nepoužívá a není vhodná pro použití u spaloven RAO. [5]

## 6 ZKUŠEBNÍ MĚŘENÍ KATEDRY ENERGETIKY VŠB - TUO

V rámci výzkumného snažení minimalizace tvorby, zpracování a trvalého uložení RAO z jaderných elektráren typu VVER, se od roku 1987 zapojila katedra energetiky VŠB-TU Ostrava do vývoje nové spalovny RAO. V té době existovala na území Československa pouze experimentálně postavená spalovna RAO Výzkumného ústavu jaderných elektráren o výkonu  $40 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ . Zde se spaloval veškerý nízko radioaktivní spalitelný odpad vyprodukovaný v ČSSR a právě na tomto zařízení probíhala první etapa výzkumné práce katedry energetiky. Spalovací jednotkou zde byla upravená dvoustupňová pec SP602 (obr. 6-1), na které byla řešena optimalizace spalování pomocí měření. [3]



Obr. 6-1: Schéma dvoustupňové pece SP602 [2]

## 6.1 Průběh měření

Měření tlaků a teplot plášťovými termočlánky probíhalo na osmi místech po celé délce spalinového traktu, analýza spalín byla prováděna plynovými analyzátory. [3]

Nejprve byla provedena měření bez spalování RAO za studena. Ta odhalila rezervy ve vzduchospalinovém traktu. Z měření vyplynulo, že trasa má nevhodnou charakteristiku a spalínový ventilátor pracuje v nestabilní oblasti. Poté, co se celá trasa důkladně utěsnila a bylo vyměněno oběžné kolo radiálního ventilátoru, mohlo spalínovým traktem protékat až  $0,8 \text{ m}_N^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Na základě studených zkoušek byly stanoveny režimy, při kterých se provoz nedoporučuje, protože by při cyklickém přikládání RAO mohlo docházet k přetlaku v peci, nedokonalému spalování doprovázenému vznikem sazí a zanášením filtrů. [3]

Při zkouškách s RAO bylo první den spáleno 250 kg RAO, z toho 16 kg vysoko výhřevného odpadu z plastických hmot (pryž, polyetylén, firon). Při spalování pouze nízkou výhřevného odpadu dojde v okamžiku dávkování k prudkému vzestupu teploty vlivem vzplanutí dobře spalitelných látek, a poté k pomalejšímu vyhořívání. Na základě teploty spalín na výstupu z pece se volil časový interval dávkování odpadu, který se pohyboval v rozmezí 10 - 12 minut, jedna dávka činila 5 až 7 kg RAO. Minimální teploty spalín na výstupu z pece kolísaly od 450 °C do 630 °C, přebytek vzduchu se pohyboval mezi 1,2 – 3,5 a obsah O<sub>2</sub> od 5 % do 15 %. Z toho lze usoudit, že nedocházelo k nedokonalému spalování a jeho důsledkům. Koncentrace CO<sub>2</sub> dosahovala 4 % až 12 %. V průběhu spalování byl dvakrát zaznamenán výskyt CO. Po celou dobu měření byl chladič zapojen jako čtyřcestný a nevyskytly se potíže se zachováním podtlaku v celém traktu. [3]

Během dalšího měření bylo spáleno 337 kg RAO, z toho 120 kg vysoko výhřevného, 60 kg plastů a gumy. Spalování probíhalo za vyšších teplot, průtočné množství spalín se pohybovalo v rozsahu od  $0,4 - 0,7 \text{ m}_N^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , přebytek vzduchu dosahoval nižších hodnot. [3]

## 6.2 Výsledky měření

Tato měření umožnila definovat předpoklady stabilního provozu bez tvorby sazí, ustálit proces spalování, optimalizovat dávkování odpadu a ukázala na potřebu citlivého prokládání různých druhů RAO při dávkování. Bylo zjištěno, že při překročení teploty za chladičem nad 150 °C je nutná regulace přísáváním do vstupního proudu spalín. Ideální teplota ve spalovací komoře byla stanovena mezi 750 °C – 800 °C, při vyšších

teplotách dochází ke vzniku prchavých radionuklidů, při nižších teplotách zase k nedokonalému spalování. Provozní teplotu lze udržet pouhým spalováním odpadu bez nutnosti použití hořáku. Optimální teplota v dohořivací komoře se nachází mezi 1000 °C – 1100 °C, pro její udržení je nutný provoz stabilizačního hořáku. Se zvyšováním teploty se musí zvyšovat také chladicí výkon, který je omezený. Zároveň pak roste aerodynamický odpor, proto je nutné zvýšit výkon ventilátoru. Tím vzroste průtoková rychlost, která může nepříznivě ovlivňovat účinnost filtrace. [3, 4]

## 7 SPALOVACÍ VÝPOČTY

### 7.1 Spalovací výpočet pro odpad

#### Určení celkové výhřevnosti odpadu

K určení celkové výhřevnosti odpadu potřebuji znát jeho složení a výhřevnosti jeho jednotlivých složek. Ty jsou uvedeny v tab. 7-1.

	složení [%]	$Q_i$ [MJ·kg <sup>-1</sup> ]
Směs papíru	12	17,6
Polyetylén	20	43,4
Polystyrén	2	38,1
Polyuretan	5	26
PVC	15	22,5
Pryž	5	34,9
Směs dřeva	41	15,4

Tab. 7-1: Výhřevnosti a složení spalovaného RAO

#### Celková výhřevnost odpadu

$$Q_{i_c} = \sum_{i=1}^7 x \cdot Q_i \quad [kJ \cdot kg^{-1}] \quad (5)$$

$$Q_{i_c} = 0,12 \cdot 17,6 + 0,2 \cdot 43,4 + 0,02 \cdot 38,1 + 0,05 \cdot 26 + 0,15 \cdot 22,5 + 0,05 \cdot 34,9 + 0,41 \cdot 15,4$$

$$Q_{i_c} = 24,288 MJ \cdot kg^{-1} = 24288 \quad [kJ \cdot kg^{-1}]$$

#### Výpočet spotřeby spalovacího vzduchu

Protože neznám přesné chemické složení paliva, určím teoretickou spotřebu spalovacího vzduchu empirickým vztahem, jako funkci výhřevnosti, např. podle Rosin-Freslinga viz. literatura [1] :

$$V_{vz,t}^s = K_1 \cdot \frac{Q_{i_c}}{4186,7} + K_2 \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (6)$$

$$\text{Pro tuhá paliva : } K_1 = 1,012 \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

$$K_2 = 0,5 \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

$$V_{vz,t}^s = 1,012 \cdot \frac{Q_{ic}}{4186,7} + 0,5 \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

$$V_{vz,t}^s = 1,012 \cdot \frac{24288}{4186,7} + 0,5 = \underline{\underline{6,371}} \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

#### Skutečné množství suchého spalovacího vzduchu

Počítám s přebytkem vzduchu  $n = 1,3$  [1]

$$V_{vz,sk}^s = n \cdot V_{vz,t}^s = 1,3 \cdot 6,371 = \underline{\underline{8,282}} \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (7)$$

Dále určím součinitel vlhkosti vzduchu  $\chi_v$ , který závisí na relativní vlhkosti  $\varphi$  [%], celkovém tlaku  $p_c$  [MPa] a parciálním tlaku vodní páry  $p''$  [MPa] dle literatury [1] a [7].

$$\chi_v = 1 + \frac{\varphi}{100} \cdot \frac{p''}{p_c - \frac{\varphi}{100} \cdot p''} \quad [1] \quad (8)$$

$$\chi_v = 1 + \frac{20}{100} \cdot \frac{0,1}{0,101325 - \frac{20}{100} \cdot 0,1} = \underline{\underline{1,246}} \quad [1]$$

#### Skutečné množství vlhkého spalovacího vzduchu

$$V_{vz,sk}^v = \chi_v \cdot V_{vz,sk}^s \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (9)$$

$$V_{vz,sk}^v = 1,246 \cdot 8,282 = \underline{\underline{10,319}} \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

#### Určení skutečného množství vlhkých spalín z odpadu

Opět pro výpočet použiji Rosin – Freslingův vztah pro výpočet teoretického množství suchých spalín :

$$V_{sp,t}^s = K_3 \cdot \frac{Q_{ic}}{4186,7} + K_4 \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (10)$$

Pro tuhá paliva :  $K_3 = 0,95 \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$

$$K_4 = 1,375 \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

$$V_{sp,t}^s = 0,95 \cdot \frac{Q_{ic}}{4186,7} + 1,375 \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

$$V_{sp,t}^s = 0,95 \cdot \frac{24288}{4186,7} + 1,375 = 6,886 \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

Skutečné množství suchých spalin

$$V_{sp,sk}^s = V_{sp,t}^s + (n-1) \cdot V_{vz,t}^s = 6,866 + (1,3-1) \cdot 6,371 = 8,777 \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (11)$$

Pro výpočet množství vlhkých spalin musím určit množství vody ve spalinách (volím množství vodíku v odpadu  $H_2 = 10$  [%], vody  $w = 20$  [%])

$$V_{H_2O} = \frac{22,4}{2} \cdot H_2 + \frac{22,4}{18} \cdot w + (\chi_v - 1) \cdot V_{vz,sk}^s \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (12)$$

$$V_{H_2O} = \frac{22,4}{2} \cdot 0,1 + \frac{22,4}{18} \cdot 0,2 + (1,246-1) \cdot 8,282 = 3,406 \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$$

Skutečné množství vlhkých spalin

$$V_{sp,sk}^v = V_{sp,sk}^s + V_{H_2O} = 8,777 + 3,406 = 12,183 \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (13)$$

## 7.2 Spalovací výpočet pro přídatný plyn

Pokud teplota ve spalovací komoře klesne pod minimální teplotu vhodnou ke spalování, zvýší se teplota použitím stabilizačních plynových hořáků. Spalovaným plynem je v tomto případě zemní plyn s výhřevností  $Q_{i_p} = 33,48 \quad [MJ \cdot m_N^{-3}]$ . Protože znám chemické složení plynu (viz. tab. 7-2.) od dodavatele, nemusím vycházet z Rosin–Freslingových empirických vztahů, ale můžu provést přesnější výpočet.

Složka	Množství [%]
CH <sub>4</sub>	98,39
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0,44
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,16
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,07
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,03
N <sub>2</sub>	0,84
CO <sub>2</sub>	0,07

Tab. 7-2: Chemické složení zemního plynu [12]

Níže uvedené vzorce jsou ochuzeny o prvky a sloučeniny, který zemní plyn neobsahuje, proto je nelze v této formě použít pro výpočet plynných paliv jiného chemického složení.

### **Určení skutečného množství spalovacího vzduchu**

#### **Množství spalovacího kyslíku**

$$V_{O_{2,t,pl}} = \sum \left( x + \frac{y}{4} \right) \cdot C_x H_y \quad [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] \quad (14)$$

$$V_{O_{2,t,pl}} = 2 \cdot 0,9839 + \frac{7}{2} \cdot 0,0044 + 5 \cdot 0,0016 + \frac{13}{2} \cdot 0,0007 + 8 \cdot 0,0003$$

$$V_{O_{2,t,pl}} = 1,998 \quad [m_N^3 \cdot m_N^{-3}]$$

#### **Teoretické množství suchého spalovacího vzduchu**

$$V_{vz,t,pl}^s = \frac{V_{O_{2,t,pl}}}{0,21} = \frac{1,998}{0,21} = 9,514 \quad [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] \quad (15)$$

#### **Skutečné množství suchého spalovacího vzduchu**

Přebytek vzduchu pro plyn  $n_{pl} = 1,1$  [1]

$$V_{vz,sk,pl}^s = V_{vz,t,pl}^s \cdot n_{pl} = 9,514 \cdot 1,1 = 10,465 \quad [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] \quad (16)$$

#### **Skutečné množství vlhkého spalovacího vzduchu**

$$V_{vz,sk,pl}^v = V_{vz,sk,pl}^s \cdot \chi_v = 10,465 \cdot 1,246 = 13,039 \quad [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] \quad (17)$$

### **Výpočet skutečného množství spalín z plynu**

#### **Teoretický objem suchých spalín**

$$V_{sp,t,pl}^s = V_{CO_2} + V_{N_2} = CO_2 + \sum x \cdot C_x H_y + N_2 + 0,79 \cdot V_{vz,t,pl}^s \quad [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] \quad (18)$$

$$V_{sp,t,pl}^s = [ 0,0007 + (0,9839 + 2 \cdot 0,0044 + 3 \cdot 0,0016 + 4 \cdot 0,0007 + 5 \cdot 0,0003) ] + \\ + (0,0084 + 0,79 \cdot 9,514)$$

$$V_{sp,t,pl}^s = 1,003 + 7,524 = 8,527 \quad [m_N^3 \cdot m_N^{-3}]$$



### Skutečný objem suchých spalín

$$V_{sp,sk,pl}^s = V_{sp,t,pl}^s + (n_p - 1) \cdot V_{vz,t,pl}^s \quad [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] \quad (19)$$

$$V_{sp,sk,pl}^s = 8,527 + (1,1 - 1) \cdot 9,514 = 9,478 \quad [m_N^3 \cdot m_N^{-3}]$$

---

### Množství vody ve spalínách

$$V_{H_2O,pl} = \sum_1^5 \frac{y}{2} \cdot C_x H_y + (\chi_v - 1) \cdot V_{vz,sk,pl}^s \quad [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] \quad (20)$$

$$V_{H_2O,pl} = (2 \cdot 0,9839 + 3 \cdot 0,0044 + 4 \cdot 0,0016 + 5 \cdot 0,0007 + 6 \cdot 0,0003) + (1,246 - 1) \cdot 10,465$$

$$V_{H_2O,pl} = 4,567 \quad [m_N^3 \cdot m_N^{-3}]$$

---

### Skutečný objem vlhkých spalín

$$V_{sp,sk,pl}^v = V_{sp,sk,pl}^s + V_{H_2O} = 9,478 + 4,567 = 14,045 \quad [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] \quad (21)$$

---

### Celkový normální průtok spalín

$$\text{Hmotnost jedné dávky odpadu } m_o = 7 \quad [kg]$$

Časová prodleva mezi jednotlivými dávkami se stanovuje podle výstupní teploty spalín z pece, pro náš výpočet volím interval dávkování na základě měření katedry energetiky VŠB s ohledem na naše parametry  $\tau = 5 \quad [\text{min}]$ .

Instalovaný příkon zemního plynu je  $140 \quad [m^3 \cdot h^{-1}]$ , provozní spotřeba plynu :

$$\dot{V}_p = 0-35 \quad [m^3 \cdot h^{-1}] \rightarrow \dot{V}_{p \max} = 35 \quad [m^3 \cdot h^{-1}] = 0,01 \quad [m^3 \cdot s^{-1}]$$

$$\dot{V}_{sp,c,n} = V_{sp,sk}^v \cdot \frac{m_o}{\tau} + V_{sp,sk,pl}^v \cdot \dot{V}_p \quad [m_N^3 \cdot s^{-1}] \quad (22)$$

$$\dot{V}_{sp,c,n} = 12,183 \cdot \frac{7}{5 \cdot 60} + 14,045 \cdot 0,01 = 0,425 \quad [m_N^3 \cdot s^{-1}]$$

---

## Výpočet tepla odvedeného spaliny a skutečného toku vlhkých spalin za spalovací komorou

Celkový tepelný příkon z odpadu

$$P_c = \dot{m}_{pal} \cdot Q_{i_c} = \frac{100}{3600} \cdot 24288 = 674,7 \quad [kW] \quad (23)$$

Celkový tepelný příkon z plynu

$$P_{c,pl} = \dot{V}_p \cdot Q_{i_p} = 0,01 \cdot 33480 = 334,8 \quad [kW] \quad (24)$$

Teplo odvedené spaliny určíme z bilanční rovnice

$$P_{sp} = P_c + P_{c,pl} = 674,7 + 334,8 = 1009,5 \quad [kW] \doteq 1,01 \quad [MJ \cdot s^{-1}] \quad (25)$$

Objemový tok vlhkých spalin z odpadu

$$\dot{V}_{sp,obj} = V_{sp,sk}^v \cdot \dot{m}_{pal} = 12,183 \cdot \frac{100}{3600} = 0,338 \quad [m_N^3 \cdot s^{-1}] \quad (26)$$

Objemový tok vlhkých spalin z plynu

$$\dot{V}_{sp,obj,pl} = V_{sp,sk,pl}^v \cdot \dot{V}_p = 14,045 \cdot 0,01 = 0,14 \quad [m_N^3 \cdot s^{-1}] \quad (27)$$

## 8 NÁVRH SPALOVACÍ PECE

### 8.1 Výpočet teploty za spalovací komorou

Pro výpočet entalpií a měrného tepla spalin volím teploty na výstupu ze spalovací komory a na výstupu z chladiče spalin. Pro běžný výpočet se volí hodnoty :

$$t_1 = 1000 \quad [^{\circ}C]$$

$$t_2 = 220 \quad [^{\circ}C]$$

Rozdíl entalpií stanovím pomocí této funkce :

$$i = 1,370816786 \cdot t + 0,000158951 \cdot t^2 \quad [kJ \cdot kg^{-1}] \quad (28)$$

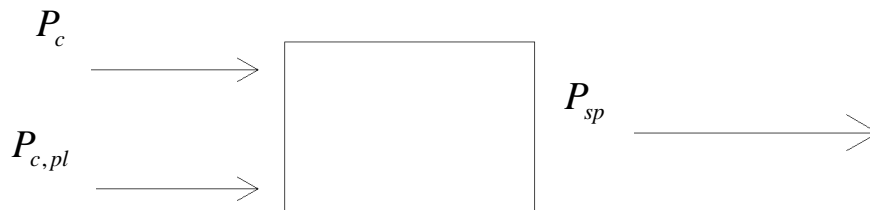
$$i_1 = 1529,8 \quad [kJ \cdot kg^{-1}]$$

$$i_2 = 309,3 \quad [kJ \cdot kg^{-1}] \quad \Rightarrow \quad \underline{\underline{\Delta i = 1220,5 \quad [kJ \cdot kg^{-1}]}}$$

### Měrné teplo spalin

$$c_{sp} = \frac{\Delta i}{\Delta t} = \frac{1220,5}{1000 - 220} = 1,565 \quad [kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (29)$$

Z tepelné bilance (obr. 8-1) určíme teplotu a množství spalin:



**Obr. 8-1: Tepelná bilance**

$$P_{sp} = P_c + P_{c,pl} \quad [W]$$

Do výpočtu musím zahrnout také ztráty vedením, sáláním a odvodem tuhých zbytků  $z = 0,2$  [1].

### Skutečná teplota spalin za spalovací komorou

$$(\dot{m}_{pal} \cdot Q_{ic} + \dot{V}_p \cdot Q_{i_{pl}}) \cdot (1 - z) = \dot{V}_{sp,obj} \cdot c_{sp} \cdot t_{sp,1} + \dot{V}_{sp,obj,pl} \cdot c_{sp} \cdot t_{sp,1} \quad (30)$$

$$t_{sp,1} = \frac{(\dot{m}_{pal} \cdot Q_{ic} + \dot{V}_p \cdot Q_{i_{pl}}) \cdot (1 - z)}{(\dot{V}_{sp,obj} + \dot{V}_{sp,obj,pl}) \cdot c_{sp}} \quad [^{\circ}C]$$

$$t_{sp,1} = \frac{\left( \frac{100}{3600} \cdot 24288 + 0,01 \cdot 33480 \right) \cdot (1 - 0,2)}{(0,338 + 0,14) \cdot 1,565} = \underline{\underline{1079,5 \quad [^{\circ}C]}}$$

### Tepelný výkon

$$Q = \dot{V}_{sp,c,n} \cdot \Delta i = 0,425 \cdot 1220,5 = 518,7 \quad [kW] \quad (31)$$

## 8.2 Spalovací a dohořívací komora

Pro zjednodušení je návrh proveden pouze pro válcovou rotační spalovací i dohořívací komoru. Navrhnout spalovací komoru je náročné kvůli působení mnoha vlivů, které nelze dopředu odhadnout. Dobrý návrh závisí na citu konstruktéra, který získá letitou praxí.

### 8.2.1 Rozměry spalovací komory

Výpočet provádím pro spalovací teplotu  $t_{sk} = 1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Skutečný tok vlhkých spalin spalovací komorou

$$\dot{V}_{SP,SK} = \dot{V}_{sp,obj} \cdot \frac{T_{sk}}{T_N} = 0,338 \cdot \frac{(1000 + 273,15)}{273,15} = 1,585 \quad [m^3 \cdot s^{-1}]$$

Objem spalovací komory

Dobu, po kterou spaliny setrvají v prostoru spalovací komory volím  $\tau_{sk} = 1,2 \text{ [s]}$

$$V_{SK} = V_{SP,SK} \cdot \tau_{sk} = 1,585 \cdot 1,2 = 1,9 \quad [m^3]$$

Délka spalovací komory (bez vyzdívky)

Vnitřní průměr spalovací komory volím  $d_{sk} = 1,1 \text{ [m]}$

$$l_{sk} = \frac{4 \cdot V_{SK}}{\pi \cdot d_{sk}^2} = \frac{4 \cdot 1,9}{\pi \cdot 1,1^2} = 2 \quad [m]$$

Průřez spalovací komorou

$$S_{sk} = \frac{\pi \cdot d_{sk}^2}{4} = \frac{\pi \cdot 1,1^2}{4} = 0,95 \quad [m^2]$$

Průměrná rychlost spalin ve spalovací komoře

$$w_{sp,sk} = \frac{\dot{V}_{SP,SK}}{S_{sk}} = \frac{1,585}{0,95} = 1,67 \quad [m \cdot s^{-1}]$$

Kontrola doby zdržení spalin

$$\tau_{sk,s} = \frac{l_{sk}}{w_{sp,sk}} = \frac{2}{1,67} = 1,2 \quad [s] \qquad \tau_{sk,s} = \tau_{sk}$$

## 8.2.2 Rozměry dohořivací komory

Při výpočtu skutečného toku vlhkých spalín dohořivací komorou se připočítává k objemovému toku spalín z odpadu také objemový tok spalín z přídavného paliva. Protože teplota v dohořivací komoře  $t_{dk} = 1200$  [°C] nebude udržitelná pouhým spalováním odpadu.

$$\dot{V}_{SP,DK} = (\dot{V}_{sp,obj} + \dot{V}_{sp,obj,pl}) \cdot \frac{T_{DK}}{T_N} \quad [m^3 \cdot s^{-1}] \quad (32)$$

$$\dot{V}_{SP,DK} = (0,338 + 0,14) \cdot \frac{(1200 + 273,15)}{273,15} = 2,579 \quad [m^3 \cdot s^{-1}]$$

Objem spalín (32) vzniklý spalováním nebezpečného odpadu musí podle zákona č. 309/91 Sb. o ochraně ovzduší před znečišťujícími látkami, setrvat v dohořivací komoře minimálně 2 vteřiny.

$$\text{Volím dobu setrvání } \tau_{dk} = 2,3 \quad [s]$$

Potřebný objem dohořivací komory

$$V_{DK} = V_{SP,DK} \cdot \tau_{dk} = 2,579 \cdot 2,3 = 5,9 \quad [m^3] \quad (33)$$

$$\rightarrow \text{navrhuji } V_{DK} = \underline{\underline{6 \quad [m^3]}}$$

Délka dohořivací komory

$$\text{Vnitřní průměr dohořivací komory volím } d_{dk} = 1,4 \quad [m]$$

$$l_{dk} = \frac{4 \cdot V_{DK}}{\pi \cdot d_{dk}^2} = \frac{4 \cdot 6}{\pi \cdot 1,4^2} = 3,9 \quad [m] \quad (34)$$

Průřez dohořivací komorou

$$S_{dk} = \frac{\pi \cdot d_{dk}^2}{4} = \frac{\pi \cdot 1,4^2}{4} = 1,54 \quad [m^2] \quad (35)$$

Průměrná rychlost spalín v dohořivací komoře

$$w_{sp,dk} = \frac{\dot{V}_{SP,DK}}{S_{dk}} = \frac{2,579}{1,54} = 1,67 \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (36)$$

Kontrola doby zdržení spalín

$$\tau_{dk,s} = \frac{l_{dk}}{w_{sp,dk}} = \frac{3,9}{1,67} = 2,34 \quad [s] \quad (37)$$

Skutečná doba zdržení spalin se liší od zvolené pouze o 4 setiny sekundy, podmínka dvouvteřinového setrvání spalin ve spalovací komoře je splněna.

### **Vyzdívka spalovací a dohořivací komory**

Jako vyzdívka u komorových pecí se osvědčily monolitické bloky šamotového LCC (nízko cementového) žárobetonu s hutným kamenivem, protože vyzdívka je namáhána především mechanicky. Nebezpečné je také teplotní namáhání častými odstávkami. U komorové pece bych volil vyzdívku NOVOBET 1450 z katalogu firmy Průmyslová keramika, spol s.r.o.

U rotačních pecí se často volí několik materiálů k vyzdění, protože vlastní pec se dá z hlediska namáhání vyzdívky rozdělit na tři části. Vstupní část je namáhána především na mechanický otěr, vyzdívka za polovinou délky rotačního bubnu je znehodnocována především korozí a výpadová část rotační pece je ohrožována tvorbou nálepů. Pro snížení pořizovacích nákladů volím u rotační pece jeden typ vyzdívky, LCC žárobeton NOVOBET 1500, který relativně dobře snáší všechny tři druhy namáhání a je vhodný také z hlediska životnosti. Srovnání některých vlastností materiálů je v tab. 8-1.

Za vrstvou žárobetonu navrhuji u spalovací komory vrstvu izolační vrstvy IZOKER IZ05/2 od ostravské firmy KERAVID, a dále tenký ocelový plášť, jak je schematicky zobrazeno na obr. 8-2. U dohořivací komory jsou použity dvě izolační vrstvy viz. obr. 8-3. Hodnota tepelné vodivosti izolační vrstvy je uvedena v katalogu viz. [16].

	NOVOBET 1450	NOVOBET 1500
klasifikační teplota	1450 [°C]	1500 [°C]
teplota výpalu	800 [°C]	800 [°C]
pevnost v tlaku	min. 75 [MPa]	min. 70 [MPa]
objemová hmotnost	min. 2330 [kg.m <sup>-3</sup> ]	min. 2370 kg.m <sup>-3</sup> ]
únosnost v žáru	min. 1500 [°C]	min. 1420 [°C]
zrnitost	0-6 [1]	0-6 [1]
tepelná vodivost (1000 °C)	1,99 [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	2,03 [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
tepelná vodivost (1200 °C)	2,31 [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	2,36 [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]

**Tab. 8-1: Vlastnosti vyzdívky [18, 20]**

## 8.3 Výpočet prostupu tepla stěnou

### 8.3.1 Spalovací komora

#### Určení přestupu tepla konvekcí

Reynoldsovo číslo

$$Re = \frac{w_{sp,sk} \cdot d_{sk}}{\nu_{sp,sk}} = \frac{1,67 \cdot 1,1}{174,3 \cdot 10^{-6}} = 10420 \quad [1] \quad (38)$$

Kde  $\nu [m^2 \cdot s^{-1}]$  je kinematická viskozita spalin odečtená na základě teploty spalin  $t_{sp1} = t_{sk} = 1000 [^{\circ}C]$  z tabulek literatury [2]. Vliv tlaku je zanedbatelný.

$Re > 10000 \rightarrow$  turbulentní proudění

#### Určení Nusseltova kritéria

Nusseltovo kritérium počítám podle rovnice pro turbulentní proudění trubkami s opravným součinitelem  $\varepsilon_L$  [1] pro krátké trubky.

Opravné součinitele pro neizotermické proudění a oblouky do výpočtu nezahrnuji, jejich hodnota je v obou případech 1. Prantlovo číslo jsem určil z tabulek [2].

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \varepsilon_L = 0,021 \cdot 10420^{0,8} \cdot 0,58^{0,43} \cdot 1,42 = 38,64 \quad [1] \quad (39)$$

#### Součinitel přestupu tepla konvekcí

$$\alpha_k = \frac{Nu \cdot \lambda_{sp,sk}}{d_{sk}} = \frac{38,64 \cdot 10,9 \cdot 10^{-2}}{1,1} = 3,83 \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (40)$$

Kde  $\lambda_{sp,sk} [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$  je tepelná vodivost spalin určená podle teploty spalin z tabulky dle [2].

#### Určení přestupu tepla sáláním

Efektivní délka paprsku

$$I_{ef} = \eta_p \cdot d_{sk} = 0,85 \cdot 1,1 = 0,935 \quad [m] \quad (41)$$

Kde  $\eta_p$  [1] je součinitel efektivnosti sálání plynů,  $\eta_p = 0,8 - 0,9$  [1], volím  $\eta_p = 0,85$  [1]

### Poměrná pohltivost spalín

$$\varepsilon_{sp,sk} = \varepsilon_{CO_2} + \beta \cdot \varepsilon_{H_2O} + \varepsilon_{SO_2} = 0,085 + 1,01 \cdot 0,03 + 0,04 = 0,155 \quad [1] \quad (42)$$

Hodnoty poměrných pohltivostí u CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O a také hodnotu korekčního součinitele  $\beta$  [1] jsem odečetl z diagramů literatury [2] pro teplotu 1000 °C. Hodnotu pro SO<sub>2</sub> jsem převzal z literatury [6].

### Pohltivost stěny

$$\varepsilon_{sk} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{st,sk}} + \frac{1}{\varepsilon_{sp,sk}} - 1} = \frac{1}{\frac{1}{0,7} + \frac{1}{0,155} - 1} = 0,145 \quad [1] \quad (43)$$

Kde  $\varepsilon_{st,sk}$  [1] je poměrná pohltivost stěny, kterou volím.

### Součinitel přestupu tepla sáláním

$$\alpha_s = \frac{\varepsilon_{sk} \cdot C_o \cdot \left[ \left( \frac{T_{sk}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{st,sk}}{100} \right)^4 \right]}{(T_{sk} - T_{st,sk})} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (44)$$

$$\alpha_s = \frac{0,145 \cdot 5,67 \cdot \left[ \left( \frac{1273,15}{100} \right)^4 - \left( \frac{1263,15}{100} \right)^4 \right]}{(1273,15 - 1263,15)} = 67,07 \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

Kde: -  $C_o = \sigma \cdot 10^8 = 5,67 \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}]$  je upravená Stefan-Boltzmanova konstanta

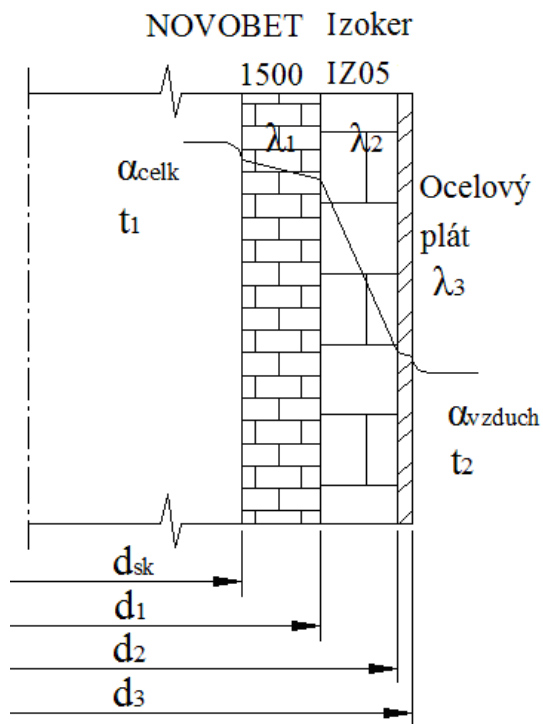
- $T_{sk} \quad [K]$  je absolutní teplota spalín ve spalovací komoře
- $T_{st,sk} \quad [K]$  je absolutní teplota vnitřní žáruvzdorné stěny (dosazují na základě výpočtu z literatury [6])

### Celkový součinitel přestupu tepla

$$\alpha_{celk} = \alpha_k + \alpha_s = 3,83 + 67,07 = 70,9 \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}] \quad (45)$$



## Prostup tepla stěnou spalovací komory



### Návrh průměrů

$$d_1 = 1,5 \text{ [m]}$$

$$d_2 = 2,5 \text{ [m]}$$

$$d_3 = 2,6 \text{ [m]}$$

### Hodnoty tepelných vodivostí

$$\lambda_1 = 2,03 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$$

$$\lambda_2 = 0,283 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$$

$$\lambda_3 = 47,9 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$$

**Obr. 8-2: Prostup tepla stěnou SK**

## Teplota sdělené 1m stěny spalovací komory

$$q_l = \frac{\pi \cdot (t_1 - t_2)}{\frac{1}{\alpha_{celk} \cdot d_{sk}} + \left( \frac{1}{2 \cdot \lambda_1} \cdot \ln \frac{d_1}{d_{sk}} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_2} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_3} \cdot \ln \frac{d_3}{d_2} \right) + \frac{1}{\alpha_{vzduch} \cdot d_3}} \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (46)$$

$$q_l = \frac{\pi \cdot (1000 - 20)}{\frac{1}{70,9 \cdot 1,1} + \left( \frac{1}{2 \cdot 2,03} \cdot \ln \frac{1,5}{1,1} + \frac{1}{2 \cdot 0,283} \cdot \ln \frac{2,5}{1,5} + \frac{1}{2 \cdot 47,9} \cdot \ln \frac{2,6}{2,5} \right) + \frac{1}{12 \cdot 2,6}}$$

$$q_l = \underline{\underline{2980 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1}]}}$$

## Teplota povrchu první stěny

$$t_{s1} = t_1 - \frac{q_l}{\pi} \cdot \left( \frac{1}{\alpha_{celk} \cdot d_{sk}} \right) = 1000 - \frac{2980}{\pi} \cdot \left( \frac{1}{70,9 \cdot 1,1} \right) = \underline{\underline{987,8 \text{ [}^\circ\text{C}]}} \quad (47)$$

## Teplota mezi první a druhou stěnou

$$t_{s2} = t_1 - \frac{q_l}{\pi} \cdot \left( \frac{1}{\alpha_{celk} \cdot d_{sk}} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_1} \cdot \ln \left( \frac{d_1}{d_{sk}} \right) \right) \text{ [}^\circ\text{C}] \quad (48)$$

$$t_{s2} = 1000 - \frac{2980}{\pi} \cdot \left( \frac{1}{70,9 \cdot 1,1} + \frac{1}{2 \cdot 2,03} \cdot \ln \left( \frac{1,5}{1,1} \right) \right) = \underline{\underline{907,0 \text{ } [^{\circ}\text{C}]}}$$

Teplota mezi druhou a třetí stěnou

$$t_{s3} = t_1 - \frac{q_l}{\pi} \cdot \left( \frac{1}{\alpha_{celk} \cdot d_{sk}} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_1} \cdot \ln \left( \frac{d_1}{d_{sk}} \right) + \frac{1}{2 \cdot \lambda_2} \cdot \ln \left( \frac{d_1}{d_2} \right) \right) \text{ } [^{\circ}\text{C}] \quad (49)$$

$$t_{s3} = 1000 - \frac{2980}{\pi} \cdot \left( \frac{1}{70,9 \cdot 1,1} + \frac{1}{2 \cdot 2,03} \cdot \ln \left( \frac{1,5}{1,1} \right) + \frac{1}{2 \cdot 0,283} \cdot \ln \left( \frac{2,5}{1,5} \right) \right)$$

$$t_{s3} = \underline{\underline{50,8 \text{ } [^{\circ}\text{C}]}}$$

Teplota vnějšího povrchu čtvrté stěny

$$t_{s4} = t_2 + \frac{q_l}{\pi} \cdot \left( \frac{1}{\alpha_{vzduch} \cdot d_3} \right) = 20 + \frac{2980}{\pi} \cdot \left( \frac{1}{12 \cdot 2,6} \right) = \underline{\underline{50,4 \text{ } [^{\circ}\text{C}]}} \quad (50)$$

Žádná z teplot nepřekračuje nejvyšší přípustnou teplotu daného materiálu. Teplota poslední stěny nepředstavuje pro pracovníky vážné nebezpečí z hlediska popálení.

### 8.3.2 Dohořivací komora

Výpočet je analogický jako u spalovací komory, hodnoty veličin odečítaných z tabulek jsou pro teplotu  $t_{sp2} = t_{dk} = 1200 \text{ } [^{\circ}\text{C}]$ .

Reynoldsovo číslo

$$Re = \frac{w_{sp,dk} \cdot d_{dk}}{\nu_{sp,dk}} = \frac{1,67 \cdot 1,4}{221 \cdot 10^{-6}} = \underline{\underline{10579 \text{ } [1]}}$$

$Re > 10000 \rightarrow$  turbulentní proudění

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \varepsilon_L = 0,021 \cdot 10579^{0,8} \cdot 0,56^{0,43} \cdot 1,35 = \underline{\underline{36,63 \text{ } [1]}}$$

Součinitel přestupu tepla konvekcí

$$\alpha_k = \frac{Nu \cdot \lambda_{sp,dk}}{d_{dk}} = \frac{36,63 \cdot 12,62 \cdot 10^{-2}}{1,4} = \underline{\underline{3,30 \text{ } [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]}}$$

Efektivní délka paprsku

$$I_{ef} = \eta_p \cdot d_{dk} = 0,85 \cdot 1,4 = 1,2 \text{ } [m]$$

### Poměrná pohltivost spalín

$$\varepsilon_{sp,dk} = \varepsilon_{CO_2} + \beta \cdot \varepsilon_{H_2O} + \varepsilon_{SO_2} = 0,085 + 1,01 \cdot 0,02 + 0,02 = 0,125 \quad [1]$$

### Pohltivost stěny

$$\varepsilon_{dk} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{st,dk}} + \frac{1}{\varepsilon_{sp,dk}} - 1} = \frac{1}{\frac{1}{0,7} + \frac{1}{0,125} - 1} = 0,119 \quad [1]$$

### Součinitel přestupu tepla sáláním

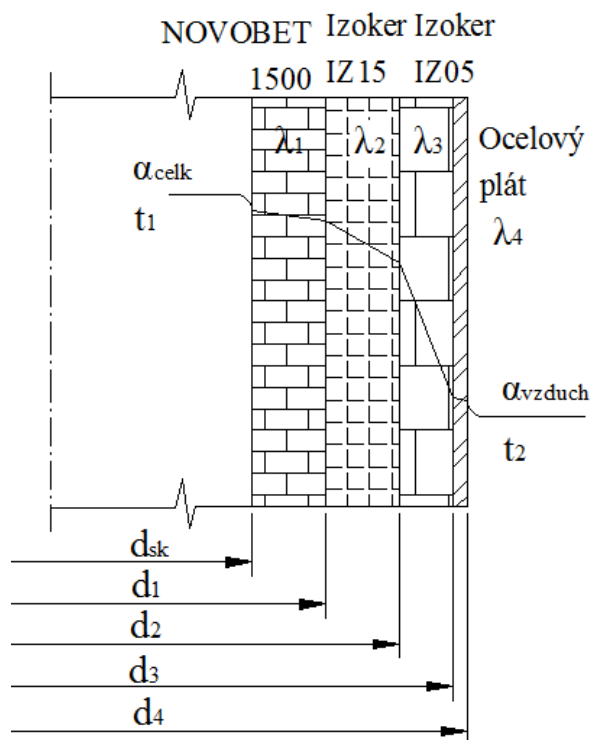
$$\alpha_s = \frac{\varepsilon_{dk} \cdot C_o \cdot \left[ \left( \frac{T_{dk}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{st,dk}}{100} \right)^4 \right]}{(T_{dk} - T_{st,dk})} \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$
$$\alpha_s = \frac{0,125 \cdot 5,67 \cdot \left[ \left( \frac{1473,15}{100} \right)^4 - \left( \frac{1463,15}{100} \right)^4 \right]}{(1473,15 - 1463,15)} = 89,72 \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

### Celkový součinitel přestupu tepla

$$\alpha_{celk} = \alpha_k + \alpha_s = 3,30 + 89,72 = 93,02 \quad [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

### **Prostup tepla stěnou dohořívací komory**

Na rozdíl od spalovací komory v tomto případě navrhují 2 vrstvy izolačního materiálu. První vrstva IZOKER IZ15 je na bázi šamotu, díky tomu je odolnější proti vysokým teplotám. Následující vrstva je opět IZOKER IZ05, která má lepší izolační vlastnosti. Prostup tepla stěnami je znázorněn na obr. 8-3.



Obr. 8-3: Prostup tepla stěnou DK

### Návrh průměrů

$$d_1 = 1,8 \text{ [m]}$$

$$d_2 = 2,2 \text{ [m]}$$

$$d_3 = 3,2 \text{ [m]}$$

$$d_4 = 3,3 \text{ [m]}$$

### Hodnoty tepelných vodivostí

$$\lambda_1 = 2,36 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$$

$$\lambda_2 = 1,25 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$$

$$\lambda_3 = 0,283 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$$

$$\lambda_4 = 47,9 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$$

### Teplo sdělené 1m stěny spalovací komory

$$q_l = \frac{\pi \cdot (t_1 - t_2)}{\frac{1}{\alpha_{celk} \cdot d_{dk}} + \left( \frac{1}{2 \cdot \lambda_1} \cdot \ln \frac{d_1}{d_{dk}} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_2} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_3} \cdot \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_4} \cdot \ln \frac{d_4}{d_3} \right) + \frac{1}{\alpha_{vzduch} \cdot d_4}} \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (51)$$

$$q_l = \frac{\pi \cdot (1200 - 20)}{\frac{1}{93,02 \cdot 1,4} + \left( \frac{1}{2 \cdot 2,36} \cdot \ln \frac{1,8}{1,4} + \frac{1}{2 \cdot 1,25} \cdot \ln \frac{2,2}{1,8} + \frac{1}{2 \cdot 0,283} \cdot \ln \frac{3,2}{2,2} + \frac{1}{2 \cdot 47,9} \cdot \ln \frac{3,3}{3,2} \right) + \frac{1}{12 \cdot 3,3}}$$

$$q_l = 4470 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1}]$$

### Teplota povrchu první stěny

$$t_{s1} = t_1 - \frac{q_l}{\pi} \cdot \left( \frac{1}{\alpha_{celk} \cdot d_{dk}} \right) = 1200 - \frac{4470}{\pi} \cdot \left( \frac{1}{93,02 \cdot 1,4} \right) = 1189,1 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

### Teplota mezi první a druhou stěnou

$$t_{s2} = t_1 - \frac{q_l}{\pi} \cdot \left( \frac{1}{\alpha_{celk} \cdot d_{dk}} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_1} \cdot \ln \left( \frac{d_1}{d_{dk}} \right) \right) \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$t_{s2} = 1200 - \frac{4470}{\pi} \cdot \left( \frac{1}{93,02 \cdot 1,4} + \frac{1}{2 \cdot 2,36} \cdot \ln \left( \frac{1,8}{1,4} \right) \right) = \underline{\underline{1113,3 \text{ } [^{\circ}\text{C}]}}$$

Teplota mezi druhou a třetí stěnou (mezi izolacemi)

$$t_{s3} = t_1 - \frac{q_l}{\pi} \cdot \left( \frac{1}{\alpha_{celk} \cdot d_{dk}} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_1} \cdot \ln \left( \frac{d_1}{d_{dk}} \right) + \frac{1}{2 \cdot \lambda_2} \cdot \ln \left( \frac{d_1}{d_2} \right) \right) \text{ } [^{\circ}\text{C}]$$

$$t_{s3} = 1200 - \frac{4470}{\pi} \cdot \left( \frac{1}{93,02 \cdot 1,4} + \frac{1}{2 \cdot 2,36} \cdot \ln \left( \frac{1,8}{1,4} \right) + \frac{1}{2 \cdot 1,25} \cdot \ln \left( \frac{2,2}{1,8} \right) \right) = \underline{\underline{999,1 \text{ } [^{\circ}\text{C}]}}$$

Teplota mezi čtvrtou a pátou stěnou

$$t_{s4} = t_2 + \frac{q_l}{\pi} \cdot \left( \frac{1}{\alpha_{vzduch} \cdot d_4} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_4} \cdot \ln \left( \frac{d_4}{d_3} \right) \right) \quad (52)$$

$$t_{s4} = 20 + \frac{4470}{\pi} \cdot \left( \frac{1}{12 \cdot 3,3} + \frac{1}{2 \cdot 47,9} \cdot \ln \left( \frac{3,3}{3,2} \right) \right) = \underline{\underline{56,4 \text{ } [^{\circ}\text{C}]}}$$

Teplota vnějšího povrchu čtvrté stěny

$$t_{s4} = t_2 + \frac{q_l}{\pi} \cdot \left( \frac{1}{\alpha_{vzduch} \cdot d_4} \right) = 20 + \frac{4470}{\pi} \cdot \left( \frac{1}{12 \cdot 3,3} \right) = \underline{\underline{55,9 \text{ } [^{\circ}\text{C}]}} \quad (53)$$

Vypočítané teploty ani v tomto případě nepřekračují teploty nebezpečné jednotlivým materiálům. Teplota vnějšího povrchu ocelového pláště je 55,9 °C.

## 9 ZÁVĚR

Dá se očekávat, že produkce RAO poroste, a to jak v celosvětovém, tak národním měřítku. Jedním z důvodů jsou plánované výstavby nových jaderných elektráren po celém světě a návrat k jaderné energii jako takové, po letitém zanevření některých zemí na tento druh energetiky způsobený Černobylskou katastrofou.

V České republice se plánuje výstavba nových bloků jaderných elektráren Temelín a Dukovany. Tím značně vzroste i množství nízko radioaktivních odpadů. Vzniku RAO nelze zabránit, ale naší snahou by mělo být jeho množství minimalizovat. Jedním z možných řešení je dekontaminace. Výzkumnou prací odborníků by se v budoucnu mohlo dospět k účinnějším metodám, které by vedli k možnosti dekontaminace i více zamořených součástí nebo tekutin a jejich opětovnému použití. Odpad, který nelze dekontaminovat nebo není dekontaminován kvůli finanční náročnosti tohoto procesu, musí být pro svojí nebezpečnost izolován od životního prostředí ve speciálních úložištích. Skladování RAO je dlouhodobou záležitostí. I nízko aktivní odpad se zde musí uchovávat stovky let, proto časem musí vznikat nová úložiště.

Spalováním RAO dosáhneme významné objemové i hmotnostní redukce, čímž šetříme úložištní kapacity. Navíc můžeme využít uvolněného tepla k výrobě teplé užitkové vody, páry nebo elektrické energie. Při použití dostupných technologií a metod čištění spalin je spalovna RAO ekologicky bezpečné zařízení likvidující odpad.

Cílem bakalářské práce byl návrh zařízení, které je schopno zajistit likvidaci tohoto toxického materiálu s vysokou účinností filtrace spalin. Osobně se přikláním ke kombinaci spalovací rotační pece s dohořivací komorou, pro kterou jsem provedl zjednodušený spalovací výpočet, návrh rozměrů a materiálů stěny, včetně výpočtu prostupu tepla stěnou. Ve spalovací komoře je spálen RAO, který je automaticky dávkován v určitých časových intervalech v závislosti na teplotě v peci. Vzniklé spaliny o teplotě mezi 1000 °C až 1100 °C putují do dohořivací komory, kde se zdrží minimálně 2 vteřiny. Teplota zde dosahuje 1200 °C. Následné chlazení spalin probíhá výměníkem spaliny-vzduch. Vzhledem k malému výkonu spalovny, nepovažuji za výhodné energetické využití odpadního tepla. Za vhodné metody čištění spalin pokládám kombinaci tkaninového filtru, polosuché chemické metody a absolutního HEPA filtru. Kombinace těchto metod čištění spalin sníží emise pod limitní hodnoty. Pro případ vysrážení spalin bude okolo filtrů veden obtok, aby nedošlo k jejich poškození tekutými spalinami. Teplota spalin je snímána, pokud by klesla pod jejich rosný bod, vstup do filtru se uzavře. Celý vzduchospalinový trakt musí být dostatečně zabezpečen také z hlediska možného úniku toxických plynů a radioaktivního záření.

## 10 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] ČERNÝ, Václav, JANEBA, Břetislav, TEYSSLER, Jiří. *Parní kotle*. Praha : SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1983. 858 s.
- [2] KADLEC, Zdeněk. *Průvodce sdílením tepla pro požární specialisty*. Ostrava 2009, 100 s. ISBN: 978-80-7385-0616
- [3] KOLAT, Pavel. *Zneškodňování radioaktivních odpadů spalováním*. Energetika, 6/ 1989, s.201-207
- [4] Kolektiv vědeckých pracovníků. *Overinie experimentálneho zariadenia VÚJE pre spalovanie pevných RAO*. Jaslovské Bohunice, 1987. 46 s. Závěrečná zpráva za HE 01. Výskumný ústav jadrových elektrární Trnava.
- [5] Materiály prof. Ing. Pavla Kolata, DrSc
- [6] MAŤEJKA, Marek. *Návrh spalovny nebezpečných odpadů*. Ostrava, 1999. 60 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc
- [7] PROCHÁZKOVÁ, Olga. *Návrh spalovny radioaktivních odpadů*. Ostrava, 2007. 42 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc
- [8] TOMČALA, Jiří, KOLAT, Pavel. *Likvidace radioaktivních odpadů spalováním*. Jaderná energie, 1/1990, s. 32-35
- [9] VOTAVA, Miroslav. *Malé spalovny průmyslového odpadu s využitím tepla*. Energetika, 8/1994, s. 256-258
- [10] <<http://odpady.ihned.cz/c1-20893840-institucionalni-radioaktivni-odpady>>
- [11] <<http://odpady.tf.czu.cz/p/Spalov.pdf>>
- [12] <<http://vytapani.tzb-info.cz/t.py?t=16&i=89&h=38&obor=5>>
- [13] <[http://www.energetik.cz/hlavni3.html?m1=/zakony/354\\_2002.html](http://www.energetik.cz/hlavni3.html?m1=/zakony/354_2002.html)>
- [14] <<http://www.globalspec.com/reference/23701/203279/F-Fabric-Filter-Bag-f-FWS-Constructed-wetland>>
- [15] <<http://www.javys.sk/sk/index.php?page=nakladanie-s-rao/rozdelenie-rao>>
- [16] <[http://www.keravit.cz/down/materialove\\_listy\\_2008.pdf](http://www.keravit.cz/down/materialove_listy_2008.pdf)>
- [17] <[http://www.nukemtechnologies.com/fileadmin/pdf/Brochure\\_Incineration\\_April\\_2007.pdf](http://www.nukemtechnologies.com/fileadmin/pdf/Brochure_Incineration_April_2007.pdf)>
- [18] <<http://www.prumyslova-keramika.cz/data/File/pdf/clanky-pps-pdf/04.pdf>>

- [19] <<http://www.prumyslova-keramika.cz/data/File/pdf/clanky-pps-pdf/05.pps>>
- [20] <[http://www.prumyslova-keramika.cz/data/File/pdf/ml/NOVOBET\\_1450\\_Stabil\\_FS.pdf](http://www.prumyslova-keramika.cz/data/File/pdf/ml/NOVOBET_1450_Stabil_FS.pdf)>
- [21] <<http://www.simopt.cz/energyweb/web/rao/sk/21.htm>>
- [22] <<http://www.simopt.cz/energyweb/web/rao/sk/31.htm>>
- [23] <[http://www.sujb.cz/docs/Hosp\\_RAO\\_2009.pdf](http://www.sujb.cz/docs/Hosp_RAO_2009.pdf)>
- [24] <[http://www.ujd.gov.sk/narspr/2\\_6\\_1\\_5.htm](http://www.ujd.gov.sk/narspr/2_6_1_5.htm)>
- [25] <<http://www.vscht.cz/uchop/udalosti/skripta/ZOZP/skriptaZOP.doc>>
- [26] <<http://www.vscht.cz/uchop/velebudice/odpady/malesice.htm>>